

기술정책 기상리영책

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY



2020.

6

특집

중규모 대류계 기상현상의 이해와 대응

칼럼 | 호우 피해, 어느 만큼 대비할 수 있다 |

정책초점 | 코로나, 4차 산업혁명, 그리고 대기 관측 |
| 도시 돌발홍수 관리를 위한 수문과 기상 기술의 융합 |
| 기후변화 대응과 소하천 계측기술 |

논단 | 돌발 기상 예보와 과제 |
| 중규모 대류계의 예측 |
| 위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단 |
| 중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언 |

포커스 | 집중호우 등 풍수재 사고와 담보보험 |



기상청

『기상기술정책』

Vol.13, No.1(통권 제30호)

2020년 6월 30일 발행

등록번호 : 11-1360395-000017-09

ISSN 2092-5336

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

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

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

원고모집

『기상기술정책』에서는 기상과 기후분야의 정책이나 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: 김종석

편집기획: 국립기상과학원(책임운영기관) 연구기획재정과

편집위원장: 주상원

편집위원: 정관영, 신동현, 이은정, 하중철,

박록진, 반기성, 홍진규, 김도우

편집간사: 이희춘, 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: 중규모 대류계 기상현상의 이해와 대응

칼럼 03 _ 호우 피해, 아는 만큼 대비할 수 있다 / 김종석

정책초점 06 _ 코로나, 4차 산업혁명, 그리고 대기 관측 / 홍진규

24 _ 도시 돌발홍수 관리를 위한 수문과 기상 기술의 융합 / 황석환·이동률

41 _ 기후변화 대응과 소하천 계측기술 / 정태성

논단 53 _ 돌발 기상 예보와 과제 / 이우진

66 _ 중규모 대류계의 예측 / 이동규

80 _ 위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단 / 손병주

91 _ 중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언 / 이규원

포커스 106 _ 집중호우 등 풍수재 사고와 담보보험 / 이보영

호우 피해, 아는 만큼 대비할 수 있다



김종석
기상청장

최근 10년(2009~2018년) 동안 ‘호우로 인한 재산피해는 1조 5,146억 원에 달한다. 이는 1조 6,826억 원 수준의 태풍에는 약간 못 미치지만, 대설(2,409억 원), 지진(983억 원), 풍랑(464억 원)과 같은 주요 기상재해 현상과 비교해서는 압도적인 수치를 보여주고 있다. 과거 30년간의 관측자료와 기후모델을 통해 동아시아에서의 집중호우 및 가뭄 발생 상황을 분석한 최근 연구에 따르면, 장마 기간 중 단기간에 더 많은 비가 내리고 이후 고온건조한 기간이 장기화되는 경향성을 확인했다. 연구진은 이러한 경향성의 원인으로 기후변화를 지목했고, 이는 지구온난화가 계속되는 한 호우로 인한 피해가 앞으로 더 심각해질 수 있음을 경고하고 있다.

여름철 집중호우는 돌발적이고 국지적인 특성으로 나타나 큰 피해를 준다. 집중호우를 유발하는 소나기구름 즉, 적란운은 2~20km의 작은 크기부터 200~2,000km에 이르기까지 다양하게 발달하는데, 적란운 세포로 구성된 구름의 발달 시스템을 ‘중규모 대류계’라고 간단히 정의할 수 있다. 중규모 대류계는 주로 여름철에 우박과 벼락을 동반하여 운항 중인 항공기, 등산객의 사고 발생 위험을 높이기도 한다. 우리나라는 북태평양 고기압의 가장자리에 위치하는 기압배치가 자주 나타나, 서해상에서 불어오는 습한 바람과 기상조건의 결합으로 적란운이 발생하면 집중호우가 자주 유발된다. 적란운은 대기 경계층에 가둬진 잠열 에너지가 역전층 해소로 인해

일시에 상승하면서 발생하기 때문에 많은 연구에도 불구하고 아직은 예측이 어려운 경우가 많다.

중규모 대류계의 예측기술 발전을 위해서는 물리적 메커니즘을 규명하는 이론과 함께 수치예측 기술과 비중관 관측자료 동화 기술이 뒷받침되어야 할 것이다. 이를 위해서는 핵심자료만을 예보 담당자에게 지원하는 종합적인 기술시스템 도입, 선진 연구결과의 지속적 학습 및 활용, 사용자에 대한 신속·유용한 정보 전달에 노력해야 한다. 의사가 증상에 기반을 두어 병명을 진단하듯이 정확한 예보에는 관측이 중요하고, 관측-모델-자료동화 분야 등의 전문가 간 유기적 협력체계가 요구된다. 현재 정부주도로 이뤄지는 관측에서 탈피하여, 시민의 참여를 확대함으로써 빅데이터 분석이 가능해지고 있다. 한편 구체적인 접근법으로 중규모 수치예측모델 개선과 기상청의 가용 비중관자료 활용을 확대하여 한반도에서 발생하는 중규모 대류계와 강수예측 정확도 향상 연구를 발굴하거나, 중규모 대류계에 대한 고해상도 앙상블 예측방법 개발, 도시지역의 특성을 고려한 도시모델 개발을 고려할 수 있다. 마지막으로 위성을 활용한 강우유형 및 특성 분석을 통해 한반도에서의 강우 예측성능을 향상할 수 있을 것이다.

재해 예방 차원에서 호우가 일으키는 침수피해 예방을 위해 레이더와 실황예보 등을 활용한 돌발홍수예보시스템을 향상할 수 있도록 인력과 기술교류를 추진하고, 4차 산업혁명 기술을 적극적으로 접목해 나가야 할 것이다. 중소규모 도시지역의 피해 저감에는 CCTV를 활용한 자동유량계측기술에 정확한 예보가 제공되어 소하천 주변 지역 주민의 안전을 도모해야 할 것이다. 마지막으로 인명재산상의 피해를 회피할 수 있는 보험상품 개발에 기상정보가 합리적으로 활용될 수 있도록 해야 할 것이다. 더 나아가 집중관측의 계획단계부터 실행방안, 연구방안, 그리고 현업화 방안까지 중장기로 계획되고 이를 지속적으로 추진할 수 있는 정책이 뒷받침되어야 할 것이다. 국제공동 집중관측 프로그램을 수행하고 관측장비 구매-운영, 집중관측-모델 개선, 관측자료 생산-활용의 선순환 구조를 구축하여 집중관측의 효율성을 증대시켜야 할 것이다.

기상청은 지난 5월 15일부터 서울시의 특보구역을 세분화해서 발표하고 있다. 기존 서울 전체를 1개 구역으로 발표하던 것에서 동남권·서남권·서북권·동북권의 4개 구역으로 구분한 것이다. 이는 국지적인 기상재해로 증가하는 피해를 줄임으로써 효율적 방재대응을 지원하기 위한 기상청의 노력 중 하나이다. 중규모 대류계가 아무리 변덕스럽고, 예측이 어려운 벽으로 느껴지더라도, 기상청은 상기에 제시된 다양한 연구와 시도를 통해 국민의 안전한 생활을 보장하는데 힘쓸 것이다.

정책 초점

코로나, 4차 산업혁명, 그리고 대기 관측

| 홍진규

도시 돌발홍수 관리를 위한 수문과 기상 기술의 융합

| 황석환·이동률

기후변화 대응과 소하천 계측기술

| 정태성

코로나, 4차 산업혁명, 그리고 대기 관측

홍진규 연세대학교 교수 jhong@yonsei.ac.kr

- I. 진단과 예측: 코로나로부터의 교훈
- II. 왜 온습도계 인가?
- III. 뜨거운 감자: 장비 국산화와 가짜 자료
- IV. 특이극한 현상과 장기 관측
- V. 종관 관측에서 중규모 관측으로
- VI. 글을 마무리하며

현재는 계산자원의 발달로 인한 모델 고해상도화, 위성의 활용, 최첨단 자료동화 기술의 발달과 인공지능을 이용한 일기예보의 시대를 맞이하고 있다. 전혀 새로운 일기예보 환경이 조성되는 상황에서 우리는 기본적인 사실에 충실할 필요가 있다. 정확한 진단을 위한 관측, 관측 전문가에 기반한 관측과 최첨단 대기 관측장비가 어우러져야 하며, 모델 고해상도에 발맞춰 모델링 전문가, 자료동화 전문가 집단과의 유기적 협력체계가 필요하다. 정부주도의 관측에서 탈피하여 시민주도의 대규모 저가 관측을 시도하고 이를 처리할 수 있는 새로운 통계적, 대기과학적 지식의 확보에도 심혈을 기울여 할 것이다. 정체된 고부가가치 관측 소재, 부품, 장비에 대한 국내시장을 활성화할 수 있는 지원과 함께, 정부주도의 지원이 가져오는 도덕적 해이를 막을 방법도 강구해야 할 것이다. 비록 당장 눈에 띄는 성과가 없을 수 있지만, 꾸준한 인력양성과 기초연구의 꾸준한 지원을 통해서 신데렐라를 탄생시키는 게임 체인저의 역할을 수행할 수 있도록 앞으로 기상청의 역할을 기대해본다. ■

“정확한 진단장비와 시약의 정확성을 통해 병의 확산을 통제 가능”

1. 진단과 예측: 코로나로부터의 교훈

“진료는 의사에게, 약은 약사에게”

신종 코로나바이러스로 전세계가 어려움에 처해있는 현재, 세계보건기구 WHO에는 코로나바이러스 감염 여부를 판단할 수 있는 증상과 감염 후 예상되는 향후 건강 상태에 관한 질문이 “자주 묻는 질문 FAQ (Frequently Asked Question)” 목록에 올라와 있다. 바이러스 감염여부와 감염 후 우리 건강상태를 유추하려는 것으로 우리 스스로 질병이 발생할 때 감염 여부를 진단하고자 하는 강한 욕구가 반영된 것이라. 하지만 비전문적 지식과 피상적이고 단편적인 사례에 기반한 이러한 자가 진단의 위험성에 대해 전문가들은 매우 강한 우려를 나타내고 있는데, 이것은 환자의 예후를 정확하게 예단하기 위해서는 ‘정확한’ 진단검사에 기반하여, 환우(患友)의 현재상태를 종합적이고 체계적으로 밝혀내는 것이 우선시 되어야 하기 때문이다.

겉으로만 드러나는 징후가 아니라 정확하고 전문지식에 기반한 진단의 중요성은 신종 코로나바이러스도 마찬가지이다. “기침, 고열, 설사, 두통, 미각 손실로 코로나 바이러스 감염 여부를 알 수 있는가”의 질문에 대한 세계보건기구의 답은 “이러한 증상만으로는 정확한 감염 여부를 판단할 수 없고, 결국 정확한 진단을 위해서는 검사를 정식으로 받으라”는 것이다.

불행 중 다행이게도 우리나라의 코로나바이러스 진단검사 능력은 많은 나라의 찬사를 받고 있다. 급박하게 사용해야 할 기술은 아니었지만 꾸준한 기초연구로 진단 장비와 시약의 정확성을 높이는 기술을 확보할 수 있었다. 그리고 진정 필요한 시기에 이를 꺼내어 우리는 신종 코로나바이러스 감염 여부를 빠르고 정확하게 진단함으로써, 감염병의 확산을 줄이는데 탁월한 성과를 내는 것이다. 즉, 정확한 진단 장비와 시약의 정확성을 통해서 코로나바이러스 감염 여부를 빠르고 정확하게 진단함으로써 우리는 병의 확산을 통제할 수 있을 뿐만 아니라, 바이러스의 확산 상황을 모델링하여 예측하는데 필요한 자료를 제공할 수도 있다.

“ 정확한 예측을 위해
정확한 진단이 필수 ”

이러한 사실은 미래의 상태를 예측하는 것은 현재 상태를 알아내는 진단이 올바르게 되어야 한다는 것을 상기시켜줄 뿐만 아니라, 기초연구의 중요성과 전문가에 대한 신뢰회복에 관해 시사하는 바가 크다고 할 수 있다. 진단(diagnosis)과 예측(prognosis)의 영어 어원을 보면 우리가 어떤 사실을 안다(gnosis)라는 점은 같지만, 사전(pro)에 일어날 일을 알기 위해서는 서로 다른 것들을 구별하는 것(dia)의 차이를 강조한다는 것에서도 진단이 가지는 의미를 알 수 있다. “기침, 고열, 설사, 두통의 증상은 신종 코로나바이러스에 감염되었다는 뜻일까?”라는 질문에 대한 답은 항상 똑같다. 증세가 의심되면 직접 검사를 받아보세요.

미래를 예측하는 몇 가지 학문분야 중에서도 날씨와 기후를 예측하는 기상청은 매일매일 예보정확성을 검증받는, 그래서 예측의 실패에 대한 비난을 안고 산다고 볼 수 있다. 몇십 년 후를 예측하는 미래학자들의 예측이 대부분 틀리고, 다음 해의 경제 성장률이나 전력수요 예측이 틀려서 발생하는 막대한 경제적 피해보다도 더 큰 비난을 감수해야 하는 것도 거꾸로 생각해보면 이러한 대기현상 예측이 일반 국민들에게 갖는 친밀성과 생활밀접정보라는 사실을 반영하는 것일 수도 있다. 더욱 정확한 일기 및 기후예측을 위해서는 이제는 단순히 ‘노오력’하는 것에서 벗어나, 대기 상태를 정확하게 진단하고 이해하기 위하여 측정과학에 대한 관심과 대기과학 분야의 고른 발전 전략이 곁들여진 ‘노오력’이 필요할 것이다. 진단의 핵심은 관측이기 때문이다.

이러한 측면에서 코로나바이러스와 관련된 일련의 사건 속에서 배울 수 있는 중요한 교훈은 정확한 예측을 위해서는 우선 정확한 진단이 필수적이라는 사실이다. 병에 걸렸을 때 향후 진행될 건강상태 변화를 정확하게 예측하는데 있어서, 환자의 상태와 원인을 정확하게 진단하는 것이 필요한 것처럼 말이다. 그리고 일기예보의 정확성 향상을 위해서 그 진단은 관측이 그 출발점이 될 것이다.

그 대표적인 예가 노르웨이의 기상학자 V. Bjerknes(1862-1951)이다(그림 1). V. Bjerknes (1862-1951)는 최초로 기상관측네트워크를 구축해 기단과 전선 등을 관측함으로써 현재의 기상상태를 보다 정확하게 진단하는데 크게 기여하였다. 수학

“ 관측으로 현상을 이해,
관측을 모형에 활용,
지식을 관측에 반영 ”

과 물리학에 두루 밝았던 V. Bjerknes는 최초로 수학을 이용한 일기예보에 대한 이론을 정립하고, 아들인 Jacob Bjerknes와 함께 노르웨이에 종관기상 관측네트워크를 구축하고 관측자료를 분석함으로써 현재 우리가 알고 있는 중위도 기압대와 극 전선(polar front) 모델을 만들어내어 일기예보의 정확성을 높이는데 결정적인 근거를 마련하였다. 현재 우리가 일기도에 사용하는 대부분의 기호를 만들어낸 장본인이기도 하다.¹⁾ 궁극적으로 관측네트워크를 통한 대기상태를 정확하게 진단하고 이해함으로써 수치예보의 시작을 알린 V. Bjerknes로부터 우리는 이론과 관측의 중요성을 모두 이해한 위대한 학자의 면모를 느낄 수 있다. 그 후에는 지상관측에만 의존하고, 당시에는 없었던 상층관측의 부재로 인한 상층의 대기구조를 파악하지 못해서 발생한 V. Bjerknes 모델도 결국 항공관측의 등장으로 해결된다. 2차 세계대전과 함께 급속도로 발전한 비행기를 통하여 상층제트가 발견되는 등의 고층 관측 자료가 얻어지고 분석이 되면서 해결되기 시작하였다. 우리는 여전히 관측을 통해 현상을 이해하고 이를 모형에 활용하며, 이러한 지식을 다시 관측에 반영하고 있다. 현재 신종 코로나로 인한 민항기 운항의 감소로 인한 대기과학의 후퇴를 걱정하는 목소리도 과장된 것만은 아니라는 것을 알 수 있다.

현재 우리는 계산자원의 발달로 인한 모델 고해상도화, 위성의 활용, 최첨단 자료동화 기술의 발달과 인공지능을 이용한 일기예보의 시대를 맞이하고 있다. Bjerknes로부터 이어진 수학 기반의 일기예보에 대한 열망이 컴퓨터와 결합하여 1954년 세계 처음으로 현업에서 수치예보가 시작된 혁명적 사건 이후, 아마도 후세에서 지금을 또 하나의 새로운 일기예보의 대변혁이 일어나는 시기라고 말할지 모르겠다. 그렇다면 4차 산업혁명, 빅데이터, 모델 고해상도화라는 새로운 시대를 준비하는 관측은 어떤 각성과 인식에서 출발해야 할지 진지한 고민이 필요한 시점이라고 할 수 있다.

[그림 1] Vilhelm Bjerknes (1862-1951)



출처: 위키피디아

1 Biography in Dictionary of Scientific Biography (New York 1970-1990).

“ 장비의 원리 이해가
관측오차를 줄이고,
일기예보의 정확도를
높일 수 있는 기본 ”

II. 왜 온습도계 인가?

“정본청원(正本淸源): 기본에 충실하라.”

수업 시간에 습도계의 원리와 전기적 특성을 가르칠 때의 일이다. 어떤 학생이 “왜 온도계, 습도계라고 따로 부르지 않고 보통 합쳐서 온습도계라고 부르나요?”라는 질문을 했다. 온습도계라는 이름과 비슷하게 풍향계와 풍속계도 우리는 풍향 풍속계라는 이름으로 합쳐서 부른다. 우리에게서는 풍속뿐만 아니라 풍향도 중요한 정보이며, 바람은 벡터라서 풍향과 풍속이 합쳐진 풍향풍속계는 쉽게 이해가 가는 일이다. 하지만 온도와 습도는 서로 다른 변수인데 하나로 부르는 이유가 무엇일지 가늠하기는 쉽지 않다. 실제로 우리가 흔히 사용하는 온습도계는 3배엽 풍속계와 풍향계(wind vane)처럼 서로 물리적 거리를 두고 합쳐져 있지 않고 하나의 센서처럼 보인다.

기온을 측정하는 온도계와 습도를 측정하는 습도계가 하나의 형태로 하나의 제품으로 불리는 것은 종관기상관측을 위해 우리가 사용하는 습도계의 측정 원리가 상대습도를 측정하기 때문이다. 상대습도는 대기 중 수증기 질량뿐만 아니라 기온에 의해서도 달라지기 때문에 비습이나 혼합비로 변환하기 위해서는 기온값이 있어야 한다. 그런데 여기서 중요한 것은 어떤 물질이 상대습도에 따라서 대기 중의 수증기를 흡수하거나 배출한다는 사실에 기반하여 습도를 측정하는 방식은 이미 15세기에 N. de Cusa(1401-1464)가 세계 최초로 발명한 습도계의 원리와 같다는 것이다. 측정의 기본 원리는 바뀌지 않았지만, 물질이 수증기를 흡수한 양에 따라 전기적 성질(예, 전기 저항, 커패시턴스 등)이 바뀌는 것을 측정할 수 있는 소재와 부품 장비가 개발됨에 따라 소형화되고 디지털화되었을 뿐이다. 따라서 여기서 습도계의 오차를 줄이기 위해서는 온도계의 오차를 줄이는 방향으로의 설치와 운영이 매우 중요한 것을 또한 짐작할 수 있다. 장비의 원리를 이해하는 것이 관측오차를 줄이고, 현재 대기상태를 정확하게 진단하여 결국 일기예보의 정확도를 높일 수 있는 기본이 되는 것이다. 아무리 우리가 4차 산업혁명 시대에 살고 있다고 해도 기본을 소

“전문가는 신뢰를 기반으로 사회에 올바른 정보제공의 의무가 있다.”

흔히 할 수 없는 이유가 이런 기본원리는 크게 바뀌지 않았기 때문일 것이다. 그리고 대기관측에서 소재 및 부품개발이 필요한 이유이기도 하다.

우리가 생활 속에서 사용하는 진공청소기, 세탁기, TV와 같은 전자제품은 구매 후 전원을 연결하여 전원버튼을 누름으로써 바로 사용할 수 있다. 이러한 전자제품의 특성은 일반인들도 무의식적으로 매우 잘 이해한다고 생각한다. 매뉴얼을 볼 필요도 없다. 하지만 우리가 전자제품의 성능이 제대로 동작

[그림 2] 3배엽 풍향풍속계(좌)와 온습도계(우)



출처: Flickr.com, 연세대학교 미기상 연구실

하고 있는지 정확하게 이해하고, 오작동과 고장의 원인을 알아보기 위해서는 제품 설명서, 즉 매뉴얼을 찾아보거나 수리 전문가에게 도움을 받아야 한다. 여기서 우리는 제품의 사용자와 제품 전문가를 쉽게 구별할 수 있다. 최근 다양한 정보가 넘쳐나면서 사용자들이 전문적 지식을 보유한 경우도 많지만, 항상 해당 분야를 깊게 공부하는 전문가의 역할을 무시할 수는 없을 것이다. 따라서 전문가는 사회에서 신뢰를 기본으로 우리 사회를 위한 올바른 정보를 제공할 의무가 있다.

우리가 흔히들 농담조로 하는 말 중에 “관측자료는 관측한 사람만 믿지 않고, 모든 사람이 믿는다”라는 것이 있다. 그만큼 참값의 의미로서 관측이 가지는 상징성이 있다. 이는 거꾸로 이야기하면 진공청소기를 사용할 때 모든 사람이 쉽고 완벽하게 작동시킬 것이라는 일반 사용자의 믿음과 달리 오작동의 원인 지식에 기반하여 문제를 해결하려고 노력하는 전문가의 관점 차이에서 발생하는 것일지도 모른다. 측정장비의 원리와 불확실성을 이해하고 자료의 품질관리와 품질향상을 위해 업

“ 기초과학의 힘은
기본에 충실한
결과로서 우리가
필요할 때
나타난다 ”

무를 수행하는 전문가라면 본인이 수행하는 관측방법 혹은 수집된 자료가 100% 신뢰할 수 있다고 생각하기 어렵기 때문이다. “아는 것이 병”이 되는 것이다. 예를 들면, 습도계는 그 원리상 습도가 높을수록 오차가 커진다고 알려져 있다. 비가 오지 않는데도 상대습도가 105%라는 값이 측정되었을 때 많은 사람은 관측을 잘못했다고 비난할 수 있을 것이다. 하지만 관측 전문가들은 100%가 넘는 상대습도가 측정될 수 있다는 사실, 그리고 그러한 원인을 줄이는 방법에 대한 고민과 모델 전문가들에게 이 값을 어떻게 전달해야 할지 고민하는 사람들일 것이다. 같은 이유로 대기의 현재 상태를 파악하고 일기예측 성능 향상을 위한 관측에 관측 전문가들이 필요하다는 것도, 이런 관측의 기본과 특성을 이해하는 전문가가 관측의 불확실성을 이해하고 최대한 정확한 관측을 수행할 것이라는 생각에서 출발하는 것이다. 장비의 원리를 이해함으로써 장비의 보정을 수행하고, 장비가 가지는 한계와 불확실성을 이해하고, 정확성을 향상할 수 있는 방법을 파악하며, 불확실성을 정량화하고, 모델 개발과 검증을 고려하기 위한 자료처리를 수행하는 것은 일기예측력 향상에 도움이 되리라는 것은 의심의 여지가 없다. 기본에 충실한 전문가가 필요한 것이다. 그리고 세계 유수의 기상장비 회사들이 대규모 장비보정 시설을 구축하고 있다는 것도 우리는 기본이 얼마나 중요한지 알게 해주는 대목이다. 기초과학의 힘은 결국 기본에 충실한 결과로서 보이지 않고 숨어있던 캐비닛 어딘가에서 우리가 필요할 때 나타난다.

III. 뜨거운 감자: 장비 국산화와 가짜 자료

“과학에 중요한 영향을 미치기 위해서는 새로운 측정 장비를 발명할 필요가 있다.”

J. Lovelock

인류의 역사에서 우리의 세계관을 바꾼 과학의 패러다임 전환이 몇 번 있었는데, 그중의 하나가 갈릴레오 갈릴레이일 것이다. 갈릴레이 발견의 핵심은 그 당시 최고

“ 기상관측장비 분야에서
국내의 히든 챔피언을
찾아볼 수는 없는 현실 ”

수준의 성능을 가진 망원경을 이용해서 얻은 천체관측 자료의 분석이 그 출발점이라고 볼 수 있다. 현재 태양계 밖에서 발견되는 4천여 개의 태양계 외부 행성들도 케플러라는 새로운 우주망원경의 관측이 크게 기여를 한 것이다. 그리고 20세기 초반 전세계의 세계관을 바꾼 상대성 이론과 양자역학의 출현은 새로운 측정과 이론이 서로의 생각을 주고받으며 발전시킨 인류의 역사적 산물이다. 이는 우리 대기과학 분야에서도 마찬가지로 20세기 중반까지만 해도 불가능했던 난류에 의한 풍속과 온도변화를 현재 측정할 수 있게 된 것은 초음파 풍속계와 같은 새로운 측정장비의 개발이 있었기에 가능했던 것이다. 이러한 측정자료는 큰에디모사나 대기경계층 모수화의 개발과 검증에 이바지함으로써, 자연재해로부터 우리를 보호할 수 있는 방패 역할을 할 수 있게 되었다.

하지만 관측장비의 개발은 쉽지 않다. 앞서 언급한 것처럼 관측자료의 사용자를 넘어서 장비의 특성을 이해하고 보다 정확한 관측을 수행하는 관측전문가와 그 자료를 분석하여 관측자료의 품질을 정량화할 수 있는 통계적, 수학적, 대기과학적 지식을 가진 전문가를 양성하기 위한 노력이 대기관측장비 개발에도 필요하다. 그에 더해 기기를 이해하고 만드는 공학적 지식과 일종의 융합 학문적 성격이 필요하다고 할 수 있다. 그리고 이러한 장비개발은 산업을 일으키고 일자리를 만들어낼 수 있는 사회경제적 측면에서 다루어져야 하는 측면도 존재한다. 따라서 국내에서도 관측장비를 개발을 통해 인류의 과학발전에 기여는 물론 우리나라 대기과학의 영역을 보다 확장하는 새로운 산업으로 확대하는 기대를 가져 볼 수 있다. “히든 챔피언”이런 말은 일반 사람들은 잘 모르지만 특정 전문분야에서 세계시장을 지배하는 우량기업을 가리키는 말이다. 안타깝지만 우리나라는 기상, 기후 및 환경 분야에서 수많은 관측장비를 수입하고 있지만, 기상관측장비 분야에서 히든 챔피언을 찾아볼 수는 없다.

앞서 언급한 가전제품에 대한 비유가 적절한지 모르겠지만, 어느 국외 과학자가 나한테 이런 질문을 한 적이 있다. “휴대폰, TV 같은 최첨단 전자제품을 만드는 한국이 기상장비를 생산하지 않는 이유가 무엇이라고 생각하는가?” 사실 우리나라도

“ 일본의 수출규제 인한 정부의 소·부·장 지원에도 기상장비 분야는 예외 ”

온습도계를 생산한다. 하지만 여전히 세계시장에서는 두각을 드러내지 못하고 있으며, 종관기상관측 장비에 해당하는 온습도계 및 3배엽 또는 프로펠러형 풍향풍속계 수준의 장비에 국한되어 있는 것도 사실이다. 고부가가치 기상측정장비에 해당하는 통합 센서, 레이더 같은 원격탐사 장비, 초음파 풍속계, 자료 집록기 등의 분야에서는 연구개발이 이루어지지 못하고 있다. 안타깝게도 국내 기상장비의 수준은 우리나라의 위상에 비해서 세계 유수의 기상장비 업체보다 열악한 편이다. 2009년 기상산업진흥법 제정 이후 전체적인 시장규모와 기상기업의 숫자는 증가하였고, 기상기업의 매출은 꾸준히 연간 1,400억 원 정도의 매출액을 기록하고 있다. 하지만 2015년 기준으로 기상기업의 수출액은 전체 매출액의 6% 정도이고 국산화율도 50%를 밑돌고 있다.²⁾

2019년 일본의 반도체 관련 수출규제로 시작된 정부의 소재·부품·장비 지원 정책에도 불구하고 우리나라 기상장비는 그 지원에서 벗어나 있는 듯하다. 한 예로, 많은 사람에게 낯선 기업인 미국의 관측장비업체인 Campbell Scientific 사는 260여 명의 직원을 고용하며, 연간 매출액 700억 원에 이른다. 그리고 세계 기상장비시장의 1/4 이상을 점유하고 있는 핀란드의 바이살라는 기상장비 분야만 연간 매출액이 3,000억 원이 넘으며, 화성 탐사선에 측정장비를 실어 보냄으로써 매우 상징적인 역할까지 수행하고 있다. 하지만 안타깝게도 국내 기상기업들은 좋은 장비의 개발보다는 많은 기상기업들이 오피상으로서의 역할만을 수행하고 있는 수준이다. 특히 세계 기상장비 시장이 4억 유로 정도에서 성장세를 멈추었지만, 기상장비를 만드는데 필요한 기술을 활용할 수 있는 수송 분야, 재생 에너지, 대기오염 측정장비 시장은 해마다 5% 이상의 고속 성장을 보이는 점,³⁾ 그리고 우리나라의 기상 및 대기질 분야에 대한 높은 관심을 고려할 때 우리나라의 높은 기술력을 십분 발휘할 수 있는 제도적/인적 자원 양성이 필요한 시기라고 생각한다.

하지만 소재·부품·장비 개발은 시간과 전문성, 그리고 국가의 지속적 투자가 필요하다. 그리고 이런 조건이 모두 만족했다 하더라도, 수입보다 경제적 효용성이 떨어

2 제3차 기상업무발전 기본계획 (2017-2021)

3 Vaisala annual report, 2019

“ 국산 장비 개발과
국외 장비 수입 중
사회적 합의 도출이
기상청에 필요한 역할 ”

어진다면 세계화 시대에서 어려운 처지에 놓일 수밖에 없다는 것도 사실이다. 언젠가 어떤 분이 이런 언급을 한 적이 있다. “당장 좋은 결과를 내주는 측정장비를 수입하는데 세금을 사용할 것인가, 아니면 시간이 걸리더라도 우리 자체기술을 개발하도록 참을성을 가지고 기다리는 것이 좋은가?” 쉽게 답하기에는 고려해야 할 것들이 많은 매우 어려운 질문이며, 다양한 의견이 존재할 것이다. 분명한 것은 우리에게 관련 기술이 있다는 것이며, 기상측기 개발에 대한 단순한 열망에서 벗어나 관련 기업의 도덕적 해이를 막는 제도적 장치 마련과 함께, 시간이 필요한 기초 분야에의 투자, 그리고 국산 관측장비 개발의 필요성과 기존 국외 정밀장비 중에서 어떤 선택지를 택할 것인가에 대한 사회적 합의를 이끌어내는 역할이 기상청에 필요하다고 생각한다.

IV. 특이·극한 기상 현상을 위한 장기 관측

“개가 사람을 물면 뉴스거리가 못되지만, 사람이 개를 물면 그것은 뉴스거리가 된다”

우리의 뇌는 반복되는 일상보다는 새롭고 특이한 일들에 더욱 관심을 가지는 경향이 있다고 한다. 이러한 호기심 많은 기질이 호모사피엔스가 이룩한 많은 것들을 만든 원동력 중의 하나일 것이다. 하지만 거꾸로 돌이켜 보면 일상의 소중함, 반복되는 것들로부터 얻는 안식과 평화의 중요성을 간과하는 것은 아닌가 하는 생각이 든다. “개가 사람을 물면 뉴스거리가 못되지만, 사람이 개를 물면 그것은 뉴스거리가 된다”는 말은 흔하지 않은 일에 대한 세간의 관심을 잘 나타내는 말이라고 할 수 있다. 하지만 요즘은 반려견 교육에 대한 관심 증대로 “개가 사람을 물면 뉴스거리가 되는 세상”임과 동시에 동물 인권 개념 정립으로 “사람이 개를 물어도 뉴스거리가 되는 세상”이다. 특이한 일과 일상의 재발견이랄까, 아니면 새로운 인식의 출발점이라고 할 수 있을까?

“ 특이 기상 발견과 이해에는 장기관측이 있어야만 가능 ”

특이하고 새로운 현상에 대한 호기심은 우리 대기과학 분야뿐만 아니라 많은 과학자가 가지고 있다. 새로운 현상을 발견하고 해석하는 것은 과학자 본연의 임무라고 부를 수도 있을지 모른다. 갑자기 발생하는 용오름 현상, 초대형 태풍이나 메가 가뭄과 폭염 현상은 뉴스의 단골 메뉴가 되기도 한다. 하지만 우리는 여기서도 “일상 다반사”에 대한 고민을 한 번쯤 해볼 필요가 있다.

“특이하다”의 사전적 의미는 “보통 것이나 보통 상태에 비하여 두드러지다”이다.⁴⁾ 즉 특이함은 보통으로부터 정의되고, 따라서 보통을 알아야 특이함을 알 수 있다. 그럼 보통상태란 무엇일까? 보통상태라는 것은 통계적으로는 평균상태를 의미할 것이다. 당연하지만 평균상태는 평균을 통해서 얻어질 것이며, 평균을 위해서 우리는 장기간 축적된 측정자료가 필요하다. 특이 기상 현상을 발견하고 이해하기 위해서는 장기관측이 있어야만 가능한 것이다. 즉 “특이하다”라는 말을 하기 위해서는 평균상태가 무엇인지 명확하게 인지해야 하며, 이는 장기관측이 왜 필요한지를 설명하는 이유이다.

우리는 특이하고 꺾어보지 못한 현상을 측정하기 위해 집중관측과 목적관측을

수행하기를 좋아한다. 이는 매우 적절하고 중요한 접근방법이다. 하지만 V. Bjerknes가 관측망의 축적을 통해 기압계의 변동성을 이해했듯이, 평균적인 상태를 정확하게 모른다면, 이러한 대규모 집중관측은 필연적으로 특이 현상을 이해하는데 큰 한계가 있을 수밖에 없다. 특이·극한 현상을 위해서 장기관측이 필요한 이유와 함께 장기관측이 필요한 또 하나의 이유는 장기관측이 계절예측과 기후 관점에서도 매

[그림 3] 베네수엘라 주변에서 발생한 용오름 현상



출처: 위키피디아

4 국립국어원 표준국어대사전

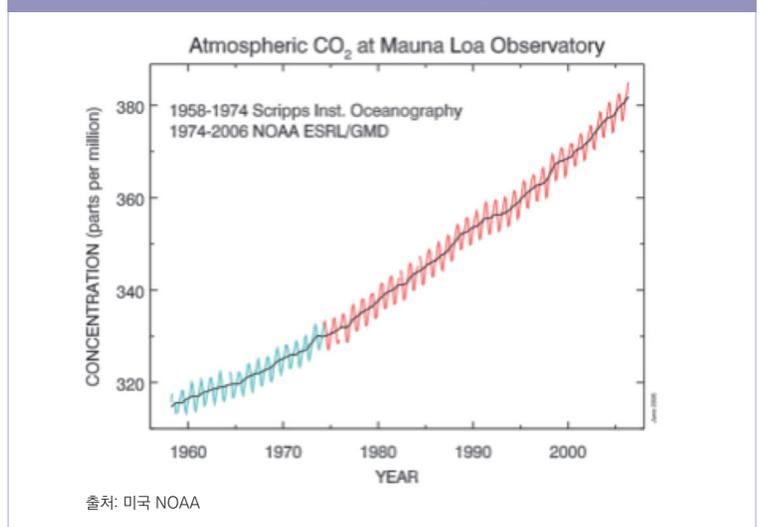
“ 장기관측은 많은 시간, 노동, 비용이 소요된다. ”

우 중요한 정보를 제공하기 때문이다. 이는 결국 난류에서 기후현상까지 모든 시간 규모에서 대기현상에 대한 이해를 증진할 수 있는 유용한 정보를 제공할 수 있다는 것을 의미한다. 그리고 이러한 장기관측은 직접관측, 지상 원격탐사, 인공위성 관측 등 서로 다른 장단점을 가진 관측 방법이 조화를 이룰 때 시너지를 낼 수 있다. 그리고 이렇게 조직된 장기관측 네트워크를 구축하기 위해서는 관측 전문가뿐만 아니라 모델 전문가, IT 전문가 및 이론가들의 도움이 필요하다. 효율적인 자료관리와 전송, 전력문제 해결, 기기의 보정 및 유지관리, 자료분석을 위한 체계적인 인력과 효율적인 의사소통 체계가 필요한 것은 당연하다.

하지만 장기관측은 어렵다. 세계에서 가장 많이 인용되는 관측자료는 아마 하와이 마우나 로아에서 1950년대 관측을 시작한 이산화탄소 농도 값일 것이다. 이러한 장기관측은 많은 시간, 노동, 비용이 든다. 심지어 관측장소와 관측시간을 결정하는 것도 과학적 근거에 기반하고 있는데 그런 전문가를 양성하기는 힘들다. 이러한 어려운 점들 때문에 장기관측을 “신데렐라 과학”이라고 부르게 되는데, 심지어 이 유명한 하와이에서의 이산화탄소 농도 관측도 연구결과의 미비와 연구비의 중단으로 한동안 자료가 없는 시기가 있다. 하지만 우리 대부분이 명확하게 이해하고 있듯이, 이 어려운 이산화탄소 농도 장기 관측은 신데렐라의 변신처럼 우리 삶의 경로를 매우 극적으로 바꾸게 된다.

마우나 로아에서의 이산화탄소 농도 관측은 관측결과가 가지는 기후변화 측면과 아울러 관측이란 무엇이며, 장기관측과 집중관측의 균형은 어디에서 찾을 것인가, 그리고 측정 자체에 집중하면서 다른 학문에 비해 연구성과가 부족할 수 있는 측정과학을 어떻게 지원해야 하는가, 그리고 일반시민에게

[그림 4] 하와이 마우나 로아에서 관측된 대기 중 이산화탄소 농도



“ 관측자료와 모델
결과의 단순비교는
모델의 예측성능을
악화시킬 수 있다 ”

어떻게 이 과학의 중요성을 설명할 것인가에 관해 많은 생각을 하게 만든다. 이러한 고민은 2000년 이후 측정과학에 대한 연구성과 조명과 관련 논의가 급물살을 타고 있으며, 우리나라 일기 예측의 최전선에 있는 기상청에서도 새로운 관측환경으로의 전환, 시민의식 향상, 모델 고해상도가 아주 빠르게 일어나고 있는 우리의 시대에 심각하게 고민해야 할 문제이다.

V. 종관 관측에서 중규모 관측으로

사과와 오렌지 비교하기

관측 장비의 기본 원리는 과거에 비해 크게 바뀌지 않았다고 앞서 언급했다. 하지만 장비의 개발과 영역 확장은 아주 빠르게 일어나고 있는 것도 사실이다. 직접 관측뿐만 아니라 다양한 관측기법이 지금도 계속 만들어지고 있다. 우주선(cosmic ray)을 이용한 토양수분 관측, 특별하게 고안된 구조를 이용하여 초미량 기체의 농도를 측정하는 분광기, 빛을 이용한 플러스 관측 등등 세계 곳곳에서 이러한 시도들은 이루어지고 있다. 그리고 무어의 법칙에 따라 계산능력의 발달은 빠르게 일어나고 있으며 이에 따라 대기모델의 고해상도에 관한 시도도 활발하게 진행되고 있다. 이제는 이음새 없는 모델링(seamless modeling)이란 용어가 낯설지 않은 이유이다. 마찬가지로 관측장비도 아주 빠르게 발달하고 있다. 하지만 인공위성 관측의 증가에도 불구하고 여전히 관측의 시공간 분해능과 대표영역은 모델 시공간 대표성의 광범위성을 따라갈 수 없다. 모델개발과 검증에 위한 관측을 위해서는 매우 다양한 점들을 고려해야 하는 이유가 여기에 있는 것이다. 잘못하면 사과와 오렌지를 비교함으로써 무의미한 결과를 만들어내는 것처럼, 단순한 관측자료와 모델결과의 비교는 잘못된 이해와 함께 모델의 예측성능을 악화시킬 수 있다.

우리가 직관적으로 시간과 공간규모가 작은 현상을 정확하게 이해하고 예측하기 위해서는 관측간격이 계속 촘촘해져야 하고, 모델의 해상도는 고해상도가 되거나

“ 단순히 관측지점을 늘리는 것은 일기예보 성능향상 목적달성을 보장하지 않는다. ”

매우 적절한 모수화 과정으로 보완되어야 함을 알고 있다. 많은 사람이 이러한 중규모 관측의 시작을 미국 오클라호마 대학의 메조넷(mesonet)으로 여긴다. 미국의 메조넷은 21세기에 들어서면서 시작되었는데, 그 논의의 출발점은 가용한 서로 다른 모든 관측자료를 모으는 네트워크들의 네트워크(network of networks)를 구축하여 그동안 숨겨져 있던 정보를 발굴하여 일기예보의 성능을 높임으로써 자연 재해를 보다 잘 대비하기 위한 것이었다.⁵⁾

하지만 메조넷에 대해 국내에서 간과된 가장 중요한 문제는 단순히 관측지점을 늘리는 것은 원래 목적을 달성하기 어렵다는 것이다. 특히나 복잡지형인 우리나라에서는 더더욱 그렇다. 과거 우리나라에서도 관측망의 수평해상도를 줄이기 위해 자동기상관측소의 숫자를 늘리는 것에만 과도한 초점을 맞춘 것은 아니었는지 되돌아봐야 할 때가 아닌가 한다. 이미 우리나라의 관측소간 평균 거리는 중규모 현상을 분해할 수 있는 약 10km 수준으로 세계 최고 수준이다. 하지만 메조넷은 수치예보 모델의 성능 향상과 더불어 그 성능을 최대한 활용하기 위해서 다음과 같은 5가지의 관측 니즈에 대해서 언급했는데 현재 우리에게 시사하는 바가 매우 크다.

- 1) 연직 해상도 및 관측범위 증가
- 2) 위성자료 등을 활용한 관측의 공간범위 증가
- 3) 토양수분 및 토양온도 관측의 필요성
- 4) 자연재해를 보다 잘 탐지하기 위한 관측
- 5) 비행기, 선박, 자동차, 기차와 같은 이동 수단을 이용한 관측과의 통합

단순하게 자동기상관측소와 같은 고정 관측소를 늘이는 것이 아니라, 중규모 현상의 3차원 구조와 지형, 대규모 및 미기상 현상과의 상호작용에 대한 이해를 바탕으로 관측변수를 지정하고, 그 관측의 시공간 분해능을 고려해야만 이를 바탕으로 수치예보 모델의 개발과 검증에 유용한 자료가 될 수 있는 것이다. 매우 촘촘한 기

5 Observing weather and climate from the ground up: A nationwide network of networks, The National Academy of Sciences.

“ 시민의 자발적 참여, 스마트폰 정보 활용, 정보오류에 대한 적극적 설명과 설득 과정이 필요 ”

상 관측망에도 불구하고 우리나라 기상자료가 수치예보의 품질 향상으로 쉽게 이어지지 못하는 점은 우리가 다시 되새겨볼 필요가 있는 대목이다. 특히 메조넷에서는 복잡한 지형과 인구밀집 지역에서의 관측 중요성을 강조하고 있는데, 특히 우리나라는 미국에 비해 작은 국토면적과 복잡한 산악지형, 지표 피복의 비균질성, 인접 바다의 역할에 의해 수치예보 모델을 테스트하기에는 극한의 장소를 보유하고 있기 때문에 단순한 관측지점의 증가만으로는 그 효과를 최대화하기 어렵다.

추가로 관측의 효율성을 증대시키기 위해서 일반 시민들의 자발적 참여와 스마트폰과 같은 개인 휴대장비의 정보를 활용하는 방안을 고려해야 한다. 정부주도의 관측망과 함께 자발적인 시민의 참여를 통한 개인기상관측망(PWS, Personal Weather Station)의 개념을 도입·활용함으로써 관측 운용의 비용을 줄이고, 빅데이터 시대의 가장 큰 장점인 풍부한 자료를 활용하는 방법을 찾아 자연재해 예측 능력을 높여 한다. 뿐만 아니라 필요한 정보를 적절한 시기에 일반 시민과 산업계로 돌려주어야 할 것이다. 더욱이 이러한 자료는 신재생 에너지 생산, 도로기상 등의 무궁무진한 응용 분야로 확대되어 우리나라의 사회경제적 가치를 높일 수 있다.

다른 한편으로는 대기관측에 대한 인식의 전환과 지식을 바탕으로 잘못된 정보에 대해 적극적인 설명과 설득이 필요하다. 몇 년 전 여름철 폭염 때 어느 방송사에서 도시 한복판 아스팔트 위의 뜨거운 기온은 측정하지 않고, 잔디가 깔린 탁 트인 노장에서 기온관측을 하는 기상청에 대한 원망 어린 보도와 관련 전문가의 인터뷰 기사를 본 적이 있다. 이러한 지적이 생기는 이유는 충분히 이해하지만, 안타까운 사실은 이러한 보도와 인터뷰가 기상청 관측망 구축의 목적을 잘못 이해했다는 점이다. 사과와 오렌지를 비교하는 것과 같다고나 할까. 강수를 만드는 종관 시스템의 특성을 정확하게 이해하기 위해서는 관측소가 위치한 주변의 영향을 최소화하는 것이 기본이다. 건물 바로 옆에서 측정한 기온은 대규모의 고기압/저기압의 이동과 특성 변화를 이해하는데 방해가 주며, 결국 잘못된 강수예보를 만들 수밖에 없게 된다.

하지만 관측장비는 무조건 잘 준비된 노장에서 관측되어야 한다는 고정관념도

“ WMO 가이드라인은 도시기상관측과 종관관측을 구별 ”

벗어날 필요가 있다. 왜냐하면 우리가 이해하려고 하는 대기현상이 중규모 또는 미 규모(microscale)라면, 그 규모의 특성을 진단할 수 있는 새로운 관측을 수행할 수 밖에 없다. 도시열섬현상과 같은 중규모 현상의 시공간 특성을 보다 잘 이해하고 싶다면, 세계기상기구의 종관관측에 관한 가이드라인은 큰 의미가 없어질 수도 있다. 가장 대표적으로 세계기상기구에서 2008년 발간한 도시기상 관측에 관한 가이드라인을 보면 관측장소의 선정, 관측지의 대표성, 기상측정의 노출오차, 메타데이터 등에 관해 종관관측과는 다른 점들을 확인할 수 있다.⁶⁾ 그리고 마지막으로 한 번 더 강조하고 싶은 것은 앞서 언급한 것처럼 관측장비의 원리를 이해하는 것이 기본이라는 사실이다. 3배엽 풍속계는 건물 사이나 나무 사이에서는 풍속을 과대평가할 가능성이 매우 높아 사용에 주의해야 하며, 위성으로 도시 표면온도를 관측할 때는 추가적인 보정 없이는 매우 큰 오차를 만들어낼 수 있다는 것을 알고 있는 사람이 많아질수록 우리의 장기관측과 집중관측을 통한 중규모 현상 관측이 더욱더 효과적으로 일기예보 성능을 향상시킬 수 있을 것이다. 결국에는 가짜 뉴스와 유사 과학자를 구별할 수 있으며, 가짜 정보의 효과를 줄일 수 있다. 이는 곧 국민을 재난으로부터 보호하며, 지속가능한 사회를 우리 후대에게 고스란히 전해주는데 있어 큰 기여를 할 것임에 틀림없다.

VI. 글을 마무리하며

“사람만이 희망이다.”

박노해

이 글을 의뢰받았을 때 수많은 생각과 경험이 머릿속을 스쳐 가면서 과연 나 스스로 정리가 될까하는 의문을 가졌다. 결국 글을 만들어내기는 했지만, 다루지 못한 사실들과 오해를 낳을 수 있는 문장들을 보며 글에 대한 두려움이 생기는 것도

6 Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites, WMO Report 81, 2008

“ 시민참여자료 통한
개인기상관측망
빅데이터 구축 ”

사실이다. 하지만 이러한 시작이 대기관측 문제가 토론의 장으로 나와 오해를 풀고, 서로를 이해함으로써 일기예보 성능이 향상되는 출발점이 된다면 그 또한 중요한 기여가 되리라 생각한다. 그런 의미에서 집중관측에 대한 기상청의 관심은 대단히 고무적이라고 볼 수 있다. 하지만 단순한 열정을 넘어 새로운 시대와 모델 고해상도에 따른 관측방법 재고와 인력 양성, 우리 사회의 문제해결을 위한 기상측기의 개발 등과 같이 산적해 있는 현안을 해결하기 위한 다양한 노력이 필요한 시기이다.

4차 산업혁명과 포스트 코로나는 존재 여부를 따지는 것과 함께 그 존재에 따른 대변혁에 대한 대비가 이루어져야 한다. 최근 신종 코로나바이러스의 확산으로 항공기 운항 횟수가 줄고, 관측을 위한 캠페인이 어려워지면서 전 세계적으로 관측수행이 어려워지고 있다고 한다. 실제로, 신종 코로나 확산 이전보다 항공기에서의 기상관측이 40% 정도 줄어들었다고 한다. 그리고 이러한 관측감소가 일기예보 정확도 감소와 기후연구의 후퇴를 유발하지 않을까 우려하는 목소리도 점점 커지고 있다. 이는 그만큼 관측자료가 우리 대기과학에 있어 잘 보이지 않는 큰 역할을 수행하고 있다는 것을 역설적으로 말해준다. 포스트 코로나 시대의 대기관측은 어떻게 나아가야 할 것인가라는 열린 질문에 대해서도 우리의 열린 접근방법이 필요한 시기가 아닌가 한다. 그리고 신종 코로나 사태와 같은 급변하는 사회경제 시스템 속에서 관측의 공백을 막고, 자연재해로부터 사회경제 시스템을 보호하기 위해서 우리는 정부주도의 관측 탈피, 시민주도의 관측과의 결합, 그리고 이러한 빅데이터를 처리할 수 있는 새로운 통계적, 대기 과학적 지식의 확보에도 심혈을 기울여 할 것이다.

유사과학(類似科學, Pseudo-science)과 가짜 뉴스로 인한 피해는 막대하다. 마찬가지로 잘못된 측정에 기반한 잘못된 관측자료는 일기예보뿐만 아니라 사회 전반적으로 큰 피해를 일으킨다. 따라서 이러한 유사 자료의 중요성을 줄이기 위해서는 유사 관측 및 전문가를 골라낼 수 있는 식견을 키워야 하지만, 동시에 장비의 정확도가 완벽하지는 않더라도 시민들의 자발적 참여에 의한 대규모 관측자료로의 확장도 필요하다. 시민참여 자료는 자동기상관측망 AWS(Automatic Weather Station)를 넘는 개인기상관측망 PWS(Personal Weather Station)로서 빅데이터

“ 관측전문가 양성,
모델 개발자 간의
지속적 협업 필요 ”

를 만들고, 이에 기반한 자료분석과 모델개발 및 검증이 이루어진다면 향후 우리의 기술력을 크게 도약시킬 수 있을 것이다. 이는 궁극적으로 잘못된 자료의 효과를 줄여 궁극적으로 다양한 방법으로 일기예측 능력이 향상할 것이다. 아울러 단순한 관측자료의 사용자로서가 아니라 장비의 원리와 보정을 수행하고 자료의 품질을 이해하는 관측 전문가가 서로 소통하며 자료의 효율성을 극대화한다면 모델의 고해상도와 맞물려 수치예보모델 성능 향상에 크게 기여할 것임은 다시 강조할 필요가 없을 것이다.

우리는 종관 시스템의 관측 시대에서 중규모 그리고 미규모 현상의 관측을 위한 갈림길에 서 있다고 볼 수 있다. 인공지능과 빅데이터를 처리할 수 있는 기술은 관측의 패러다임을 바꾸어 시민이 참여하는 대규모 관측자료로부터 새로운 방법의 일기예보가 가능해질 것으로 보인다. 이러한 의미에서 기존 종관관측 시스템을 보완함과 동시에 그동안 확장된 지상관측망에 대한 재평가와 과거에 수행된 장기관측과 집중관측의 공과를 살펴보는 것은 큰 의미가 있을 것이다.

그리고 일기예보 향상을 위한 집중관측의 성공을 위해서 새로운 인식과 관점에서 장기관측 네트워크를 평가하고, 이를 기반으로 집중관측의 수행방법에 대해 진지한 논의가 필요하다. 지구시스템은 기상변수만의 관측으로는 이해할 수 없는 것이다. 그리고 이러한 논의는 관측 전문가 양성과 함께 모델 개발자와의 지속적인 협업을 통해서 이루어져야 한다. 그리고 이러한 노력들이 모여 산·학·연이 함께 일자리를 만들 수 있는 히든 챔피언을 만들고, 동시에 대기과학의 다양한 분야에 이바지할 수 있는 기초학문의 역할을 올바르게 작동시킬 것이다. 비록 관측장비의 개발과 관측 자체가 당장 눈에 띄는 성과는 없을 수 있지만, 신데렐라를 탄생시키는 게임 체인저의 임무를 수행할 수 있도록 앞으로 기상청의 역할을 기대해본다.

도시 돌발홍수 관리를 위한 수문과 기상 기술의 융합

황석환 한국건설기술연구원 연구위원·돌발홍수연구센터장 sukany@kict.re.kr
이동률 한국건설기술연구원 선임연구위원·골든타임확보연구단장 dryj@kict.re.kr

- I. 도시홍수특성
- II. 도시 돌발홍수관리 국내외 현황
- III. 강우레이더 기반 국지 돌발홍수 예측 시스템
- IV. 수문-기상 융합기술에 의한 돌발홍수관리 고도화
- V. 결론

현재 우리나라는 국가차원에서 주요 본류나 지류(국가하천 위주)에 대해서만 홍수예보를 실시하고 있어 공간적 규모면에서 실제 피해가 빈번히 발생하는 지방하천 및 도심 구간까지 예보가 미치지 못하고 있다. 수문-기상 융합기술에 의한 돌발홍수관리 고도화를 통해 사용자가 체감할 수 있는 정보를 제공하기 위해서는 레이더 활용한 관측, 레이더 기반 QPE 향상, 앙상블예보, 실황예보, 4차산업혁명기술 활용 등이 요구된다. 변화하는 시대적 흐름에 부응하여 수문-기상의 융합기술 개발 및 이를 이용한 돌발홍수 예측기술 개발을 통해 수재해로 인한 국민의 생명과 재산 피해를 보호하는 노력을 경주해 나가야 할 것이다. ■

“ 돌발홍수는 1~2시간 내에 침수 등의 피해를 유발 ”

1. 도시홍수특성

2017년 7월 14일~16일 충청지역 집중호우로 청주, 천안, 괴산 등 충청지역에서 사망 5명, 783억 원의 재산피해가 발생했다. 2018년 8월 28일 돌발홍수로 인해 서울 중랑천 동부간선 도로에서 주행하던 차가 침수되어 운전자가 사망하였다. 그리고 2019년 10월에는 태풍 미탁의 내습으로 인해 14명이 사망 또는 실종되고 수백 명에 이르는 이재민이 발생했다. 이처럼 예고 없이 퍼붓는 비로 인한 돌발홍수 위험을 사전에 예측하지 못하거나, 제때 예보하지 못하여 차량의 침수나 사람이 급류에 휩쓸리는 안타까운 사고가 줄어들지 않고 있다. 이러한 돌발홍수는 1~2시간 내에 침수 등의 피해를 유발하기 때문에, 사고 직전까지도 위험을 감지하기 매우 어려운 경우가 많다. 하지만, 불과 수십 분 전에 예보가 가능하다면 충분히 스스로 대피하여 피해를 예방할 수 있는 재난에 해당한다.

호우특보는 수 시간 전에 예보한다는 점에서 호우로 인한 피해를 사전에 대비하는데 큰 기여를 한다. 그러나 3시간(기존 6시간), 12시간 누적강수량 기준은 1~2시간 집중호우로 인한 피해를 예보하는 데는 한계가 있다. 실제로 이러한 짧은 시간의 집중호우는 거의 실황에 가깝게 예보되는 사례가 빈번하다. 현재 기상청에서 제공하는 호우특보는 지역 특성이 반영되어 있지 않아 체감할 수 있는 정확한 홍수 위험을 전달하는 데는 어려움이 따른다. 즉, 지역특성을 반영하지 않은 강우량 중심의 일률적인 호우특보는 실제 우리가 겪을 수 있는 국지적·돌발적 홍수위험까지 정밀하게 예측하는데 한계가 있다. 동일한 강수량이라도 지형지물이나 환경에 따라

[그림 1] 최근 돌발홍수 발생 사례



'17년 집중호우(청주)



'18년 집중호우(중랑천)



'19년 태풍 미탁(울진)

“ 국내 홍수대응기술은 발생 가능성의 일방적 제공 방식 ”

물이 한곳으로 모이는 양과 유속에는 차이가 발생한다. 서울 강남과 같은 저지대 도심과 지리산 산지 마을은 홍수의 크기나 발생 시간이 달라진다. 따라서 돌발홍수 위험의 정확한 전달을 위해서는 강우량 외에 지형 등 해당 지역별 홍수 발생 특성을 고려한 빠르고 정확한 돌발홍수 해석과 예측이 필수적이다.

현재는 국가차원에서 주요 본류나 지류(국가하천 위주)에 대해서만 홍수예보를 실시하고 있어 공간적 규모면에서 실제 피해가 빈번히 발생하는 지방하천 및 도심 구간까지 예보가 미치지 못하고 있다. 그리고 국내의 홍수대응기술은 홍수로 인

한 하천 범람이나 침수를 예측하여 발생 가능성만을 일방적으로 제공하는 방식이다. 동일한 패턴의 홍수 상황에서도 사회가 다원화되면서 생활환경과 행동양식에 따라 피해 정도와 양상은 크게 달라질 수 있으나, 현재의 방식으로는 사용자들이 체감할 수 있는 홍수피해 정도 및 규모 예측이 어렵다.

돌발홍수는 매우 짧은 시간 내에 피해를 유발하기 때문에 사고 직전까지도 위험을 감지하기 어렵다. 필자가 만나본 관계기관 공무원들은 한결같이 돌발홍수 위험 정보가 불과 수십 분 전에만 제공되더라도 인명 사고 예방에 효과가 클 것이라 말하고 있다. 재난대응 실무에 있어 위험예측정

[그림 2] 지역적 홍수 특성을 반영하기 어려운 기상청 호우특보 기준

호우특보 발표기준 변경
*시행 : 2018년 6월 1일
*자료 : 기상청

| | 호우주의보 | 호우경보 |
|----|------------------------------|-------------------------------|
| 현재 | 6시간 70mm 12시간 110mm 이상 예상 | 6시간 110mm 12시간 180mm 이상 예상 |
| 개선 | 3시간 60mm 12시간 110mm 이상 예상 | 3시간 90mm 12시간 180mm 이상 예상 |

출처: 부산일보

[그림 3] 최근 홍수 발생 패턴을 반영하지 못하는 대하천 중심 홍수예보



“ 산지 돌발홍수 예보 시스템은 미국의 체계를 그대로 사용 중인 문제있음 ”

보의 제공 자체가 매우 어렵고 중요하다는 점을 시사한다. 이러한 측면에서 국내외 기술동향 및 필자의 연구결과와 경험을 바탕으로 효과적인 미래의 도시 돌발홍수 해석 및 예보기술 개발 방향에 대한 제언을 하고자 한다.

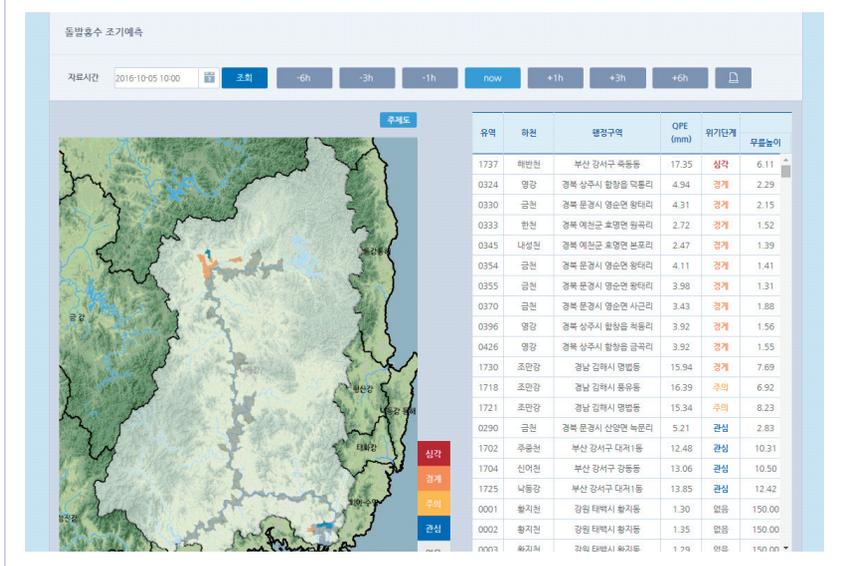
II. 도시 돌발홍수관리 국내외 현황

가. 국내 돌발홍수 예·경보 현황

● 산지 돌발홍수 예보시스템

환경부 한강홍수통제소는 비슬산 레이더 자료가 활용된 「돌발홍수예측모형」을 적용하여 실시간 돌발홍수예측시스템을 지리산 산악지역인 남강유역을 대상으로 구축한 바 있다. 돌발홍수예측시스템은 지천과 산지 등에 신속한 돌발홍수 모니터링 및 대응을 목적으로 개발됐다. 시스템은 지역특성을 고려하여 단위유역에 대한 경고 기준치를 사전에 설정하여 실시간 유역강우가 단계별 기준치의 어느 수준에 근접하는지 직관적으로 모니터링할 수 있도록 구성하였다. 그러나 해당 시스템은 미국의 돌발홍수시스템 체계를 그대로 도입하여 구축·사용 중인 문제가 있다. 왜냐하면, FFG(Flash Flood Guidance)를 결정하는

[그림 4] 낙동강 산지 돌발홍수예보 시스템(홍수통제소)



“ 도농사업단은 320종
강우시나리오별
침수시나리오를 생산,
83개 배수구역
단위로 DB를 구축 ”

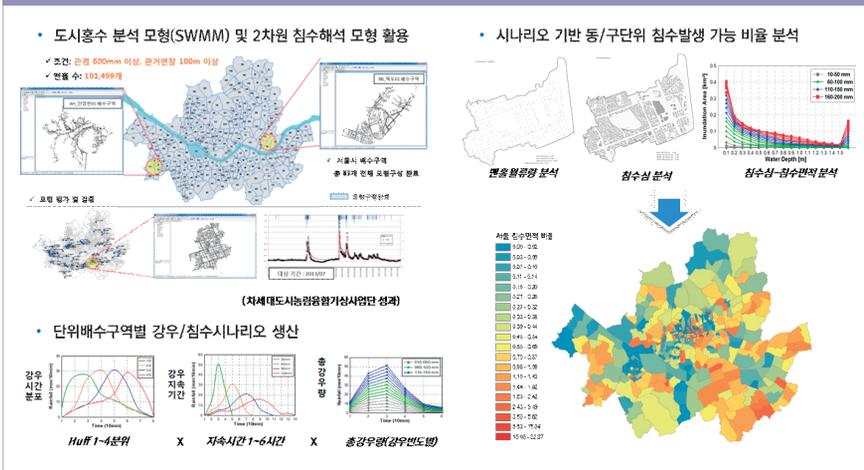
핵심인자인 한계유출량의 경우 토양수분이 완전히 포화된 상태에서 유량이 하천의 제방을 월류할 때까지 필요한 직접유출량 기준이기 때문이다. 이는 대부분 불투수지역이고 복잡한 인위적 유출구조를 가진 도시지역에 적용하는 데는 한계가 있는 것으로 지적된다.

● 서울시 내수침수 예측시스템

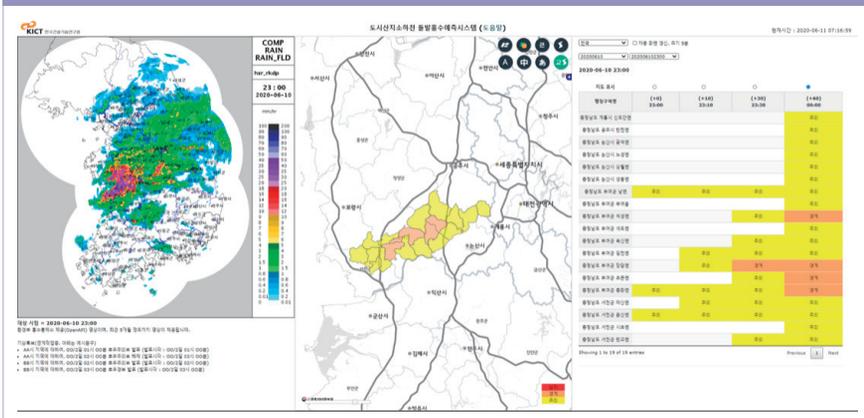
「차세대도시농림융합기상사업단」은 서울시를 대상으로 도시 돌발홍수 예측을

위해 내수침수모형을 구축하였다. 320종의 강우시나리오별 침수시나리오를 생산하여 83개 배수구역 단위로 DB를 구축하였다. 해당 시스템은 정밀한 배수관망 해석을 통해 침수예측의 공간적 정밀도를 높였다는 점에서 장점이 있으나, 강우시나리오와 실제 예측강우의 고려가 미흡하다는 한계가 있다.

[그림 5] 서울시 돌발홍수 예·경보 시스템(윤성심, 2018)



[그림 6] 국지 돌발홍수 예보 시스템 (한국건설기술연구원)



● 국지 돌발홍수 예보시스템
 한국건설기술연구원은 전국 도시, 산지, 소하천 지역의 행정구역(동)을 대상으로 1시간 전에 돌발홍수 예측이 가능한 시스템을 구축하여 현재 낙동강 유

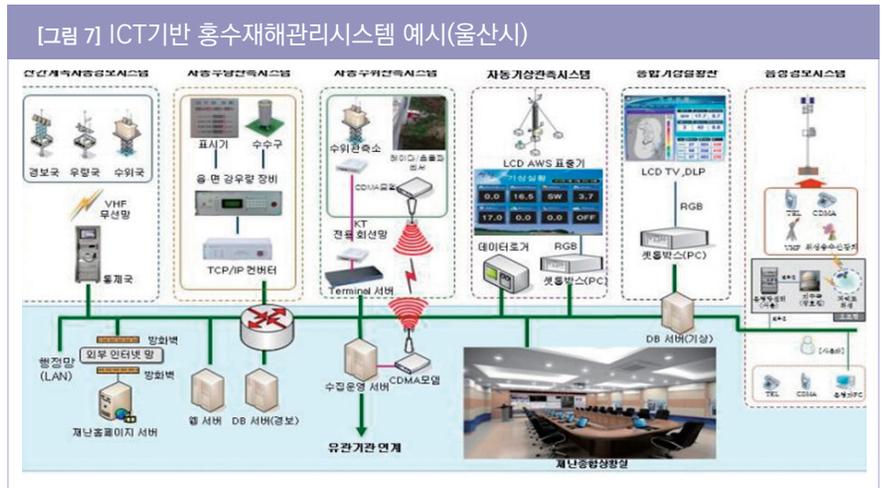
역에 시범 운영 중이다. 본 시스템은 실제 침수사례를 바탕으로 강수 및 침수와 지형인자 간의 관계식을 도출하여 미세측 지역까지 기준을 확장하였다. 그리고 환경부 레이더 강우량 기반의 초단기 예측 강수를 이용하여 기존의 반사도 기반의 예측 강수량이 가지는 정량적 불확실도를 크게 줄여 돌발홍수예측의 정확도를 현저히 높였다.

“ 청주 홍수통합관리 시스템, 울산 ICT 기반 홍수재해관리 시스템, 서울 스마트 도시홍수관리시스템 등이 구축되어 있음 ”

● 지자체 단위 홍수관리시스템

최근 10년간 반복적으로 홍수피해를 경험한 지자체 중 독립적인 홍수관리시스템을 구축한 사례도 있다.

청주시의 「홍수통합관리 시스템」, 울산시의 「ICT기반 홍수재해관리시스템」, 서울시의 「스마트도시홍수관리시스템」 등이다. 하지만 이들 시스템은 기상청 호우특보와 지상방재기상관측정보(AWS)를 사용하는 초기단계의 홍수대응 시스템이라 할 수 있다.



나. 국외 돌발홍수 예·경보 현황

● 미국

국립기상청의 홍수예·경보시스템(NWSRFS)에서는 강우와 유량 등의 자료를 수집하여 돌발홍수 예·경보와 하천홍수 예·경보 등을 수행하고 있는데, 돌발홍수 예·경보를 위한 지표로 FFG(Flash Flood Guidance, 돌발홍수능)을 1970년대 중반 처음 적용한 이래 지금까지 사용하고 있다. FFG를 결정하는데 있어서 핵심인 한계

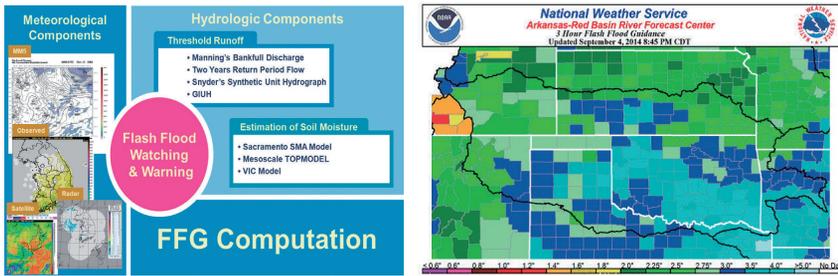
“ 덴마크 Hvidovre, 프랑스 ESPADA ”

유출량은 토양수분이 완전히 포화된 상태에서 유량이 하천의 제방을 월류할 때가지 필요한 직접유출량이다. 따라서 앞서 언급한 바와 같이 대부분 불투수지역이

고 복잡한 인위적 유출구조를 가진 도시지역에 적용하는 데는 한계가 있다.

- 유럽 덴마크의 Hvidovre 시스템은 수리해석이나 모델 정보가 고려되지 않은 경험적 관측 자료만으로 도시

[그림 8] 미국의 돌발홍수예보시스템



<돌발홍수예측시스템 구성요소>

<미국 유역 돌발홍수예보 사례>

[그림 9] 덴마크의 Hvidovre 시스템

- 과거 자료 기반 경보 시스템
 - 모델 정보 고려되지 않은 경험적 관측자료만에 의한 시스템
 - Hvidovre System, Denmark
 - “Hydrological Book Keeping Model” based on 22 urban catchment

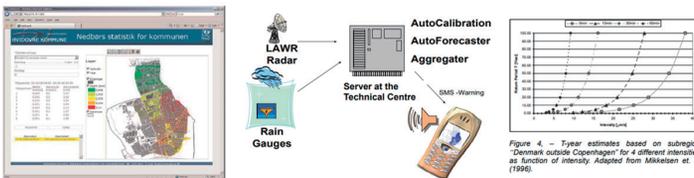


Figure 11 | Hvidovre system workflow (Jensen & Pedersen 2005)

Figure 4 - Tyrear estimates based on subregion "Denmark outside Copenhagen" for 4 different intensities as function of intensity. Adopted from Mikkelsen et al. (1996).

홍수 예경보를 실시하고 있다. 22개 도시 유역에서 수집된 레이더 강우자료를 누적하여, 그 값이 과거자료로 부터 결정된 임계값보다 큰 값을 가질 때 SMS를 통해 경보가 전송된다.

프랑스의 ESPADA 시스템은 예측강우 및 강우유출모형을 통해 매 30분마다 예측 유량을 생성하고, 이 값을 사전 모의된 44개 시나리오와 비교하여 예경보를 결정한다. 사전 시뮬레이션 기반 시스템은 사전 시나리오가 모든 시나리오를 포함해야하고, 유역 내 변화가 생기는 경우 시나리오 재생성이 필요하다는 한계가 있다.

[그림 10] 프랑스의 ESPADA 시스템

- 사전 시뮬레이션을 통한 시나리오 기반 시스템
 - Nimes ESPADA (France), Copenhagen (Denmark)
 - 사전 시나리오가 거의 모든 시나리오를 포함해야 함
 - 유역 내 변화가 생기는 경우 시나리오 다시 컴파일 해야 함



Figure 10. Map of the watershed of the 4 catchments in the city of Nimes.



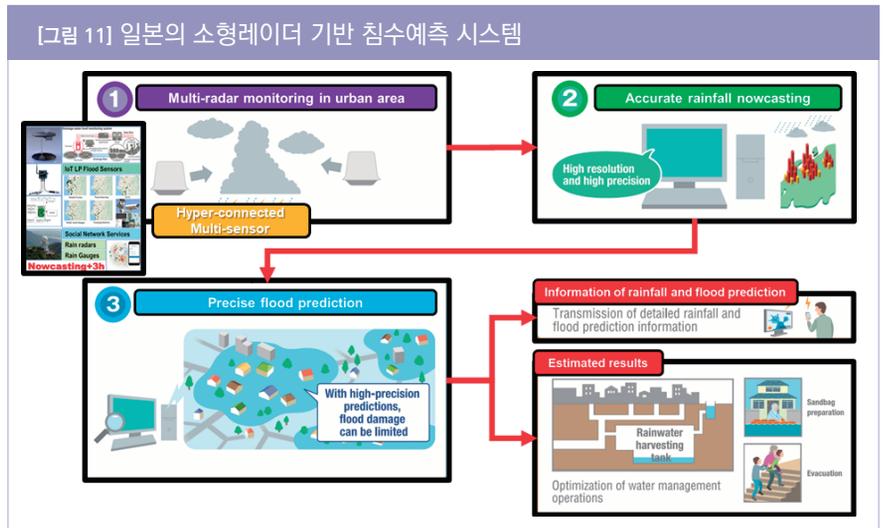
Figure 10 | ESPADA system architecture (Jensen & Pedersen et al. 2005)

- 유역크기: 50-100km² (강남구 2배)
- 유량 및 강수 30개소에서 관측 및 매 15분마다 중앙 시스템에 업데이트
- 예측 유량 매 30분 마다 시스템에 업데이트
- 예측 유량을 44개의 사전 시나리오와 비교하여 예경보 발령여부 결정

“ 일본의 경보시스템은 적란운의 특성을 고려 ”

● 일본

일본은 2014년 국지성 폭우로 인한 산사태로 77명이 사망한 재해를 계기로 집중호우시 지역과 강우량을 사전에 예측하는 경보시스템을 개발하였다. 해당 시스템은 국지성 폭우를 야기하는 ‘적란운’의 특성(빠른 생성·소멸)을 고려하여 다수의 장소에 소형 강우레이더를 설치함으로써 폭우예측 및 신속한 경보를 통해 피해를 최소화한다. 이를 통해 우수펌프의 효과적 운용, 집중호우 및 태풍에 의한 도시형 수해 방지, 주민센터와 하수도센터에서의 피난대책 수립, 철도 운행 관리 등의 도시방재에 적극 활용하고 있다.



III. 강우레이더 기반 국지 돌발홍수 예측 시스템

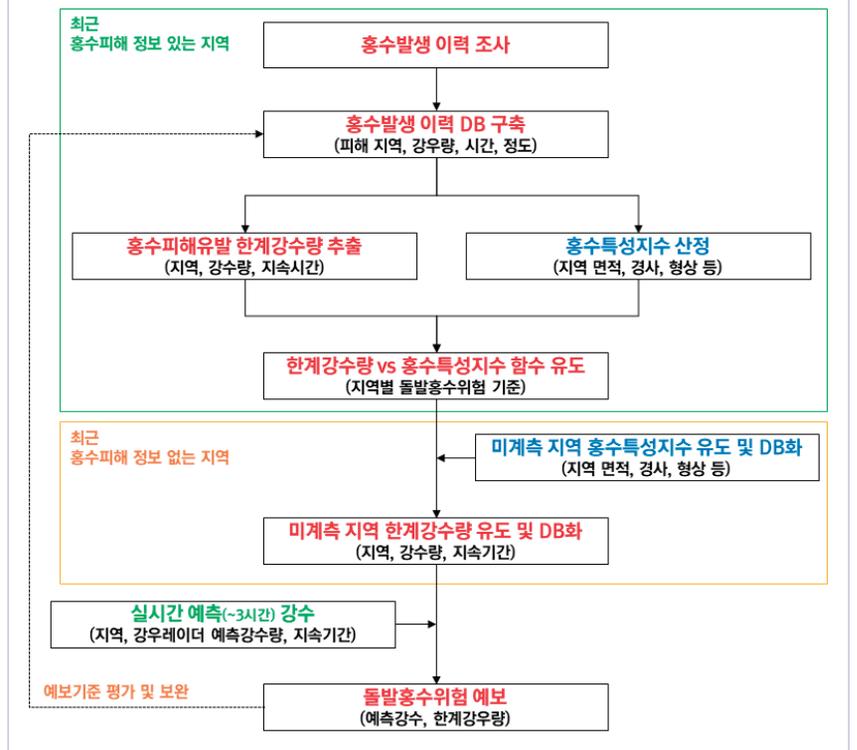
앞서 언급한 바와 같이 현행 호우주의보와 호우경보는 지역특성이 반영돼 있지 않아 정확한 홍수위험을 전달하는데 어려움이 따르고 있다. 따라서 돌발홍수의 위험성을 정확히 전달하기 위해서는 강우량 외에 ‘지형 등 해당 지역별 홍수발생 특성을 고려한 신속·정확한 돌발홍수 해석과 예측이 필수적이다. 보다 정확한 국지적 돌발홍수 예측정보를 제공하기 위해 한국건설기술연구원에서는 행정구역 맞춤형 홍수정보제공기술을 비롯해 도시·산간·소하천의 상세 지역에서 1시간 이내 돌발홍수 정보의 수집·처리·분석·경보 기술을 개발하고 있다. 개발되는 시스템은 1시간 이전에 전국 5,400여개 동(면)에 대한 돌발홍수 예측정보의 제공이 가능하다. 그

정책서점

“ 강우량 보다
홍수위험정보가
보다 체감성 높음 ”

지역특성이 고려되지 않은 호우특보 기준은 정확한 홍수위험의 전달에 역부족일 수밖에 없다. 그리고 강우량 보다는 홍수위험 정보 제공이 사용자에게 보다 체감 가능한 정보이다. 체감률이 높으면 홍수위험을 인지하였을 때 자발적인 피난의지도 높일 수 있다. 한국건설기술연구원에서 개발 중인 국지 돌발홍수예측시스템은 예측된 한계강수(홍수위험 수준별 기준 강우)를 초과할 것으로 예상되는 경우 3 단계의 단계적 돌발홍수예보(주의/경계/심각)를 발령한다. 돌발홍수예측시스템의 구축 방법 및 절차는 다음과 같다.

[그림 14] 국지 돌발홍수예측시스템의 구축 방법



IV. 수문-기상 융합기술에 의한 돌발홍수관리 고도화

가. 레이더 관측

본 절에서는 수문과 기상기술 융합에 의한 미래의 돌발홍수 관리방안에 대해 논해 보고자 한다. 수문-기상 융합 측면에서 레이더 등의 공간관측과 이를 활용한 홍수예보 분야의 협업효과가 가장 크다. 그러나 이는 각자의 전문지식이 필요한 부분이다. 특히, 지난 수십 년 간의 기술 및 운영 경험이 축적된 분야이기 때문에 단순

“ 돌발홍수 관리
고도화를 위해
정보제공 대상 및
기술적 측면 고려 ”

한 행정적 경제성의 잣대에서 일방적인 통합-운영 등을 고려하는 것은 매우 위험한 결과를 초래할 수 있다. 안전과 관련된 업무는 연습이 없으므로 어디서 누가 하느냐 보다는 어떤 확실한(검증된) 기술로 얼마나 숙련된 기술자가 실행하느냐가 중요하다. 따라서 통합보다는 숙련된 기술적 협업이 중요하며, 이는 선진국의 전문 분야별 협업체계 구축사례에서 그 방향성을 찾아볼 수 있다. 다음은 상술한 협업체계에 기반하여 수문-기상 융합기술과 돌발홍수 관리 고도화를 위한 필자의 생각이다.

첫째, 정보제공 대상 측면이다. 국가가 전국을 대상으로 돌발홍수 위험정보를 제공해야 한다. 홍수위험은 역학적으로 침수-범람-산사태가 연속하여 발생하는 것이 일반적이다. 그러나 우리가 접하는 호우특보는 물론, 침수위험/하천홍수위험/산사태위험 예측정보들이 동일한 지역에 대해서도 종합적인 고려가 미흡하고, 개별적으로 제공되는 실정이다. 이러한 경우 전문 행정인력이 부족하거나 재난대응 기반이 열악한 작은 지자체 및 일반국민이 재해에 신속히 대응하는 것은 거의 불가능하다. 거주지에 따라 안전에 차별이 있어서는 안 된다. 국가가 종합적인 돌발홍수 위험 예측정보를 제공하고, 지자체의 경우 상류 산지는 소하천 범람이나 산사태 위험, 하류 도심은 하천범람이나 침수위험 등으로 구분하여 대응토록 해야 한다. 그리고 지자체는 이 정보를 활용한 후 그 효과와 개선사항을 정부에 피드백하여 예측 정확도를 지속적으로 향상시키는 유기적인 연계체계를 마련해야 한다. 이러한 체계 구축을 통해서 지자체 단위의 중복투자나 경제적 여건에 따른 안전 불평등 문제를 해소할 수 있다.

둘째, 기술적인 측면이다. 돌발홍수는 단시간 내에 급격히 발달하거나 관측 취약 지역을 빠르게 이동하는 호우에 기인한다. 따라서, 효과적 돌발홍수 대응을 위해서는 호우의 발달 특성 파악과 수문학적 변동을 통합 관측하기 위한 기술개발이 필요하다. 이를 위해서는 넓은 지역을 빈틈없이 관측가능한 레이더로 정확한 강우량을 관측하고, 관측정확도를 개선하는 작업이 우선적으로 요구된다. 지난 20여 년 동안 레이더는 전세계 강수량 추정기법을 획기적으로 바꿔 놓았으며, 다양한 지역에

“ MPE를 이용한 QPE자료 개발 필요 ”

서 홍수예보, 수해경감 및 관리, 수자원관리 등에 중요한 역할을 담당하고 있다. 레이더 강수량 추정이나 홍수예보에 큰 기술적 발전이 있었지만, 레이더에 내재한 잠재력을 완벽히 끌어내기 위해서는 여전히 많은 도전이 필요하다. '정량적 강수량 추정(QPE)은 효과적인 홍수예보의 선행조건이다. 대표적인 예로 미국은 1990년 대 초반부터 중반까지 WSR-88D 배치를 통해 홍수예보가 극적으로 개선됐다. 그러나 그러한 긍정적인 효과는 지표인근에서 강수량 관측이 가능한 지역과 특정 계절에 국한되었는데, 이는 홍수예보의 성패가 레이더 기반 QPE의 품질에 달려 있음을 시사한다. 일반적으로 레이더 기반 QPE는 대류성(convective)호우 관측에 효율이 높아 홍수예보에 탁월한 성능을 발휘하기 때문에 돌발홍수 예보에서 레이더 기반 QPE의 역할은 특히 중요하다.

나. 레이더 기반 QPE 향상을 위한 방안

- 멀티센서 활용한 강수량 추정(MPE)

이중편파 기능을 통한 레이더 관측의 정확도 향상과 더불어 QPE 시스템은 우량계 자료 등 홍수예보를 지원하는 다른 주요 자료들을 통합해서 지역적 범위와 절대 정확도를 올려야 한다. 이를 위해서는 멀티센서 강수량 추정기술(MPE)을 이용한 QPE 자료의 개발이 필요하다(Breidenbach et al. 2002, Seo et al. 2010). 참고로 미국에서 생산하는 MPE 기반의 QPE 자료는 다음과 같다.

GAGEONLY: Gauge 활용 QPE

RMOSAIC: Radar 활용 QPE

BMOSAIC: 평균 편의(MFB) 보정 레이더 QPE(우량계 데이터 기준)

LMOSAIC: 지역 편의 보정 레이더 QPE(우량계 데이터 기준)

MMOSAIC: 멀티센서 QPE(BMOSAIC와 우량계 데이터)

MLMOSAIC: 멀티센서 QPE(LMOSAIC와 우량계 데이터)

XMRC: 예보관들이 운영면에서 '가장 훌륭한' QPE로 선정한 자료(자동 MPE 알고

리즘과 관리자가 상호 연동하여 품질 관리)

“ QPE 작업의 일부로
재분석이 반드시 요구 ”

정확한 홍수예보를 위해 토양 수분을 모의하는 수문학적 모형은 강수량이 일정 시간규모 범위에서 편의가 없고, 수문학 모델링 규모에서 가능한 한 정확해야 한다. 이를 위해 우량계 데이터를 통한 레이더 QPE 편의 보정이 필요하다. 현실에서는 우량계 관측망이 희소(稀少)할 수밖에 없으므로 레이더 QPE의 편의가 급격히 변하는 것을 산정하는 것은 일반적으로 불가능하다. 그러나 우량계 QPE에 비해 더 큰 통합 시간규모에서 편의를 산정하고, 거기서 충분히 작은 샘플링 불확실성과 가장 적절한 편의를 얻는 것은 가능하다. 우량계가 조밀한 지역에서는 레이더 QPE와 우량계 데이터를 합치면 레이더 기반 QPE의 정확도를 상당히 향상시킬 수 있다. 그리고 홍수예보에서는 강한 강수를 정확히 산정하는 것이 특히 중요하다. 레이더 QPE는 MPE 보다 평균제곱오차(MSE) 성능이 떨어지지만, 레이더만 활용한 QPE와 편 의 보정을 한 레이더 QPE는 많은 강수량에서 MPE 보다 우수한 경향이 있다. 이러한 결과는 MPE에 대해 평균제곱오차(MSE)와 조건 편의의 개선이 필요하다는 것을 의미한다.

다. 재분석 (Reanalysis)

실시간 레이더 기반 QPE 시스템을 설계할 때는 준 실시간 관측 및 재분석 능력을 고려하는 것이 중요하다. 우량계 관측자료는 빈번한 지연 전송 등으로 실시간 레이더 기반 QPE에 쓸 수 있는 우량계 개수는 많지 않다. 전송이 지연된 자료를 포함한 가능한 한 모든 우량계 자료를 써서 편의 추정을 업데이트하고 최고 품질의 레이더 기반 QPE를 수행하려면, QPE 작업의 일부로 재분석이 반드시 요구된다. 레이더 기반 QPE에서 얻을 수 있는 모든 우량계 자료를 활용한 재분석 작업의 가치는 멀티센서 강수량 재분석(MPR)을 통해서도 알 수 있다. 시간적으로 일관되고 고품질이며 과거자료 레이더 기반 QPE 산출물은 다양한 수문기상학적, 수문학적, 수문기후학적 적용을 위해 아주 유용하다. 예를 들면, 수문학 모형은 보통 정확도 때문에 보정을 하는데, 이때 고품질의 다년 자료가 축적된 QPE 자료가 반드시 필요하다. 다른 방법으로는 다차년 모형의 결과를 만들어서 그것으로부터 통계적 산출물을 만들어 내는 모형통계방법(Model Output Statistics; MOS)이 있다.

“ 불확실성을 고려하면
돌발홍수예보의
양상불예보로의
발전을 예상 가능 ”

라. 양상불 방법에 의한 접근

레이더 QPE와 여기서 산출된 돌발홍수예보 산출물을 더 잘 이해하고 오차를 줄이기 위해서는 그 안에 포함된 불확실 요소들을 정량화 할 필요가 있다. 왜냐하면 숙련된 사용자는 불확실성 정보를 위험기반 의사결정에 활용할 수 있기 때문이다. 일반 사용자는 가용한 기상자료와 비교를 통해 평가한 레이더 QPE의 예상되는 특정 규모 불확실성과 결과로부터 도출된 돌발홍수예보 산출물이 중요한 의미를 갖는다. 한편, 확률적 QPE, 실행예보, 수문학적 예보를 실시하는 다른 방법도 있다. 미국, 유럽 등에서 양상불 접근이 빠른 인기를 얻고 있는데, 비용적으로 고가이기는 하지만 상대적 단순함 때문에 많은 예보관들이 활용하고 있다. 돌발홍수예보의 불확실성이 크다는 점을 고려하면 앞으로 돌발홍수예보도 양상불 예보로 발전해 나갈 것으로 생각된다.

마. 레이더 활용 도시홍수 예보

도시화와 수해(水害)의 증가로 인해 사-공간적으로 보다 상세한 정보가 지속적으로 요구되고 있다. 미래의 홍수예보가 더욱더 레이더 기반 QPE에 의존하게 될 것이라는 것을 의미하며, 사-공간적으로 더 높은 해상도를 가진 강수량 정보를 얻으려는 노력이 계속될 것으로 전망된다.

도시지역에서의 홍수는 예고 없이 빠르게 발생한다. 아울러, 이러한 소규모 홍수는 사-공간적으로 빈번하게 발생함으로써, 이로 인한 인명재산피해를 증가시킨다. 최근 십년 내에 서울, 청주, 부산, 울산 등 우리나라 주요 도시에서 막대한 홍수 피해가 발생하였고, 이러한 사실을 근거로 홍수방어와 예보는 대규모 유역뿐만 아니라 도시유역에도 반드시 필요하다. 하지만, 전형적인 홍수방어의 접근방식(유역 유출 해석)은 때때로 소규모 유역 특히, 도시유역에 적용하는데 무리가 있다. 결국, 도심부와 같은 소규모 유역의 미래 홍수관리를 위한 궁극적인 대책은 정확하고 신속한 강우예측을 이용한 홍수예측시스템의 구축과 이를 통해 생산된 홍수예측 정

“ 예보시스템은 반드시
실황예보 기능을
포함해야 한다. ”

보로 운영되는 홍수량 저감 저류시설에 의한 분산적 홍수저감기법 개발이다. 따라서 당연히 홍수관리를 위한 레이더기술개발 기본계획도 이와 소원하지 않다고 볼 수 있다.

그 중 가장 중요한 핵심은 첫째, 레이더 강수추정 정확도 향상 기술, 둘째, 관측사각지대 해소와 빠른 관측주기 확보 기술, 셋째, 예측시간 연장을 위한 수치모형의 병합 활용 기술 개발이다. 특히, 도시홍수 관리를 위한 레이더 기술개발 측면에서 도시관측 사각지대 개선이나 관측정확도 향상을 위한 소형레이더의 효과적 설치 및 활용, 기존 대형레이더와의 효율적 융합 활용, 그리고 관측 신뢰도 향상 및 초단기 예측시간 연장을 위한 레이더 관측망 구축 및 활용기술 개발이 절실히 요구된다. 이중편파 기능을 도입하면서 QPE에 획기적인 개선이 있었으나 여전히 복잡지형에서의 관측 취약성 극복 등 해결할 문제들이 많다. QPE의 절대적인 정확도가 개선되면 유출모의의 정확도 저하 없이 레이더 QPE의 해상도를 효과적으로 개선할 수 있다. 이것은 도시지역의 돌발홍수예보에 매우 중요한 의미를 부여한다.

바. 실황예보 (Nowcasting)

레이더는 우량계와 달리 실황예보에 활용될 수 있는 연속적인 공간 데이터를 제공할 수 있다. 실황예보 선행시간은 보통 30분 정도로 알려져 있지만, 어떤 강수량 시스템에서는 선행시간을 늘릴 수도 있다. 우리나라는 통상 1시간의 선행시간이 한계로 여겨진다. 돌발홍수예보에서 예보 선행시간의 연장은 아주 중요한 이점이 되므로 예보시스템은 반드시 실황예보 기능을 포함해야 한다. 고해상도 수리모형이 도시홍수에 대한 모의정확도를 향상시키기는 하지만, 선행시간 측면에서 약점이 있으므로 최선의 방법이라고 할 수 없다. 따라서 현재 실무활용을 위해서는 간단한 모형과 실황예보를 결합한 예보기술을 발전시키는 것이 바람직하다. 여러 해 동안 실황예보를 더 정확히 수행하기 위한 수많은 기법들이 개발되었다. 계산능력이 대폭 좋아진 지금은 자료동화(data assimilation, DA) 기법도 실황예보에 적용할 수 있다.

“ 선진국과 비교해
중소하천 및 도시
지역 실시간 홍수
예보기능이 부재한
우리나라의 상황 ”

사. 4차 산업기술 활용 수문-기상 관측 및 돌발홍수예보

4차 산업혁명으로 센서와 통신, 빅데이터 처리와 인공지능 해석 기술이 급격히 발달하고 있다. 새로운 기술들의 발전 추세와 속도를 고려하면 다양한 관측 빅데이터와 인공지능 등의 첨단기술을 활용한 지능형 돌발홍수 예측기술 개발이 필요하다. 현행 국내의 홍수예보시스템은 지점관측 기반의 실시간 수문자료와 대상 유역 내 매개변수 및 강우자료를 이용한 수리수문학적 모형에 의한 예측에 기반을 두고 있다. 이를 이용해 대하천에서 발생 가능한 홍수 위험성을 분석하고, 홍수피해를 사전에 예측해 홍수예보 정보를 제공하고 있다. 그러나 대하천 중심, 수위·유량 관측 중심, 수리·수문학적 모형 중심으로 기술이 개발·구축되어 도시·산지·중소하천에 대한 홍수예보 연구는 간헐적으로 수행되어 왔고 관측 및 분석자료의 한계로 인해 실용화까지는 이어지지 못하고 있다.

홍수예보 분야의 선도기술을 보유하고 있는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서는 다중레이더와 다중센서 및 인공지능 기술을 활용하는 테스트베드를 구축해 돌발홍수와 집중호우 해석 및 예측기술 개발, 장비 개발, 실험, 교육 등에 활용하고 있다. 2018-2019년 국지성 돌발홍수와 극한강우로 인해 많은 홍수피해가 발생한 일본의 경우 X-RAIN이라는 소형레이더 관측망을 구축·운영하고 있다. 침수위험지역 내 우수펌프의 효과적 운용과 국지성 돌발홍수 또는 태풍에 의한 도시홍수의 방지, 침수 시 피난대책, 철도 운행 등 도시 방재 분야에 적극 활용하기 위해 노력하고 있다. 특히, 최근엔 인공지능과 다양한 수문관측 센서를 접목하여 홍수예측의 정확도를 높이고, ICT 기술 선점 및 안전에 빈틈없는 선진형 돌발홍수 예보체계 구축을 위해 연구를 집중하고 있다. 연구분야는 다중센서와 인공지능을 활용한 도시 중소하천의 실시간 홍수예측 연구 집중, 홍수로 인한 재난예측·관리 대응 패러다임 및 플랫폼의 변화 도모, 강우레이더 기반 스마트 돌발홍수예보 플랫폼 개발로 정리할 수 있다.

이에 비해 우리나라는 중소하천 유역 및 도시지역 실시간 홍수예보 기능 자체가 부재한 상황이다. 정부 주도의 국정과제인 '4차 산업혁명 기술' 개발에 따른 인공지

“ 4차 산업혁명 기술을
적극 개발·접목해
홍수 예측 정확도
향상에 기여 필요 ”

능 및 정보 통신 기술이 급격하게 발전하고 있음에도 이를 활용한 지능형·자율형 홍수예보기술 개발은 미진한 상황이다.

V. 결론

지난 20년 동안 레이더 기반 정량적 강수량 추정(QPE)과 홍수예보시스템의 과학기술·엔지니어링은 엄청나게 발전했다. 앞으로 레이더는 점점 더 널리 활용될 것이며 미래 홍수예보에 더 크고 중요한 역할을 할 것이다. 돌발홍수예보에서도 레이더 QPE와 실황예보의 가치는 매우 크다. 그러나 레이더 QPE와 실황예보의 잠재력을 충분히 실현하려면 아직도 많은 도전이 필요하다.

레이더를 효과적으로 운용하기 위한 숙련된 인력의 확보와 기술개발은 상당한 시간이 소요된다. 따라서 현실성 있는 중장기적 기본계획을 수립하여 단계적으로 추진하는 것이 중요하다. 이를 위해 우선 초단기 예측을 위한 실황예측기술의 개발이 요구된다. 그리고 보다 정확한 유출 모의를 위한 다양한 유출모형의 검토와 접목이 필요하다. 유출모형은 종류가 많지만, 메커니즘은 크게 다르지 않으므로 별도로 개발이 필요하지 않을 수 있다. 유출모형의 효율을 검토하여 매우 단순하고 유연한 모형을 개발 적용할 수도 있을 것이다.

한편, 아무리 정확한 예측정보일지라도 특정 지역에만 제공 가능하거나 적시에 전달할 수 없다면 정보로써 가치가 없다. 4차 산업혁명 기술을 적극 개발·접목하여 홍수 예측의 정확도가 향상되면 관측자료 부족, 과도한 관측 및 분석 시스템 구축 비용, 예보시간 확보의 기술적 한계 등의 이유로 불가능 했던 실제로 국민이 체감 가능한 정밀도와 정확도 수준을 달성할 수 있을 것이다. 또한 보다 효율적인 홍수 관리의 물론 기존 관측소의 경제적 운영 및 유지관리도 가능해질 것이다. 강우레이더 관측망을 포함한 다중센서와 인공지능을 이용하여 정확하게 돌발홍수 위험을 예측하는 기술은 앞으로 기술적 화두가 될 것이며, 관련 기술 선점에 크게 기여할 것으로 기대된다. 수문-기상의 융합기술 개발 및 이를 이용한 돌발홍수 예측기술 개발도 이러한 시대적 흐름에 부응해야 할 것이다.

기후변화 대응과 소하천 계측기술

정태성 국립재난안전연구원 연구관 bangjaeman@korea.kr

- I. 한반도 기후변화 영향과 재해특성
- II. 재난관리 대책과 계측기술
- III. 계측기술의 정의 및 분류
- IV. 소하천 계측기술

기후변화로 인해 한반도에서는 돌발 및 국지성 집중호우와 같은 극한강우 발생 빈도가 증가하고 발생지역 또한 전국으로 확대되고 있다. 그 중에서도 소규모 유역 특히 소하천에서 홍수피해가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 소하천의 홍수피해를 저감하고 하천 주변에 위치한 지역공동체의 지속적인 성장을 달성하기 위해서는 혁신적으로 계측기술을 개발하고 미래기후에 대응 가능한 재난관리 대책을 마련하는 것이 필요하다. 여기에서는 먼저 계측기술과 재난관리 대책간의 연관성을 살펴보고, 다음으로 계측기술들이 어떻게 대책마련에 기여할 수 있는지를 살펴보고자 한다. 마지막으로 계측기술들의 종류와 각각의 장단점 분석을 통해 소하천 재난관리에 적합한 계측기술로 CCTV 기반 자동유량계측기술을 소개하고자 한다. 자동유량계측기술은 소하천 홍수 예·경보 서비스 개선과 미래재난에 대응 가능한 기후변화 적응기술 개발을 지원함으로써 지속가능한 공동체 개발을 가능케 할 것으로 기대된다. ■

“ 지구온난화로 인해
한반도 연평균강수량은
25.13mm 증가
할 것 ”

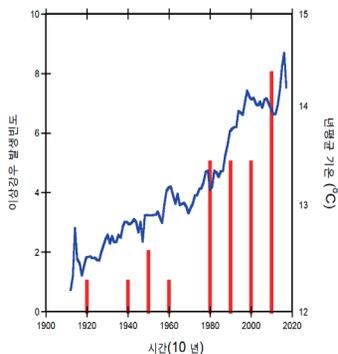
1. 한반도 기후변화 영향과 재해특성

국립기상과학원(2018)이 발표한 보고서에 따르면 한반도는 기후변화로 인해 지난 106년(1912-2017년)동안 연평균기온이 1.8℃ 상승하였으며[그림 1(a)], 30년 평균 강수량은 과거 1,181.4mm에서 최근 1,305.5mm로 10.5% 증가한 것으로 나타났다. 국립재난안전연구원(2019)이 1927-2019년의 92년 동안 우리나라에서 발생한 시간당 100mm 이상의 극한강우(Extreme Rainfall)를 분석한 결과 한반도에서는 10년 단위 극한강우 발생빈도가 [그림 1(a)]와 같이 꾸준히 증가하고 있는 것으로 나타났다. 분석결과에 따르면 극한강우는 1980년대 5회로 급격하게 증가하여 이후 최근까지 점진적으로 증가하는 추세를 보이는 것으로 나타났다. 이 기간 동안 국내에서 발생한 극한강우는 [그림 1(b)]와 같이 전국에서 고르게 발생했으며, 특히 장마의 영향이 큰 경기도와 태풍의 주 영향권에 놓여있는 제주도를 포함한 남해안 지역에서 주로 발생하고 있는 것으로 나타났다. 2019년에는 그동안 홍수피해가 거의 발생하지 않던 경북 울진지역에서도 104.5mm/h의 극한강우가 발생하는 등 극한강우의 발생지역 또한 점차 확대되고 있어 이에 대한 철저한 대비가 요구된다.

IPCC가 발표한 기후변화 시나리오에 따르면 금세기 말에 해양에서는 시나리오에 따라 1.6℃에서 최대 4.3℃ 상승하고 육지에서는 2.5℃에서 최대 6.9℃ 정도 상승

할 것으로 예상됐다. 기온상승과 함께 강수량도 증가할 것으로 예측되었는데, 지구온난화로 전세계 강수량은 연평균 11.54mm 증가할 때 한반도는 25.13mm 증가해 한반도의 강수량 증가폭이 더욱 크게 나타날 것이라고 예측하였다. 따라서 한반도는 연평균 기온과 강수량의 급격한 증가에 따른

[그림 1] 1920년부터 2019년 까지 92년간 우리나라에서 발생한 극한강우 빈도 변화 및 분포도



(a) 극한강우 빈도(■) 및 연평균기온(—) 변화



(b) 극한강우 발생지역 분포도

“ 국가·지방하천보다
극한강우의 영향을
많이 받는 소하천 유역 ”

극한강우 또한 지속적으로 증가할 것으로 예측된다.

한반도에서 극한강우는 돌발 및 국지성 집중호우형태로 나타나고 있으며 과거에 비해 강우강도가 증가¹⁾하고 지역적으로도 일부지역에 집중됨에 따라 발생지역에서는 피해가 커지는 것으로 나타났다. 게다가 이들 피해는 비교적 규모가 큰 국가하천이나 지방하천 유역보다는 규모가 작은 소하천에서 주로 발생하는 것으로 나타나 소하천 주변의 지역공동체가 극한강우의 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타났다. 소하천은 「하천법」에 준용을 받지 않는 하천 중에서 길이 500m 이상, 하폭 2m 이상인 하천으로 전체 하천길이 65,295km의 54.1%에 해당하며, 국내에는 2019년 기준 22,426개의 소하천이 존재한다. 최근 10년간(2009-2018년) 하천에서 발생한 피해를 조사한 결과 <표 1>과 같이 소하천에서 발생한 피해가 전체 피해액의 약 42.3%인 2,896억원에 이르는 것으로 나타났다.

<표 1> 최근 10년간('09년~'18년) 하천 피해현황(재해연보)

| 피해내용 | 전체 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---------------------|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 전체하천 피해액 (억원) | 6,847 | 938 | 577 | 2,266 | 1,458 | 413 | 1.05 | 3.28 | 621 | 299 | 271 |
| 소하천 피해액 (억원) | 2,896 | 431 | 262 | 878 | 661 | 237 | 0.42 | 2.48 | 165 | 146 | 113 |
| 소하천 피해액 비율(%) | 42.3 | 45.9 | 45.4 | 38.7 | 45.3 | 57.4 | 40.0 | 75.6 | 26.6 | 48.8 | 42.0 |

II. 재난관리 대책과 계측기술

재난관리 대책은 크게 구조적 대책과 비구조적 대책으로 구분할 수 있다. 구조적 대책으로는 소하천정비 및 홍수터 혹은 우수 저류지 등의 시설물 설치가 있으며, 비구조적 대책으로는 홍수 예경보가 대표적이라고 할 수 있다. 기후변화에 대응하기 위한 재난관리 대책을 수립하기 위해서는 국내 환경에 맞게 개발·검증된 재난관리 기술(최적 설계기술과 홍수 예측기술)이 요구되는데, 국내에서는 주로 수치모형을 사용하여 흐름거동 해석이나 홍수량 예측 등을 수행하고 있다. 기후변화 대응을 위한 재난관리 대책 마련에 있어 하천에서 계측된 수리·수문 정보는 위험도

1 연평균 강우량은 과거에 비해 약 15%정도 증가하였고, 강우 발생시간도 줄어들면서 강우강도가 증가하였다. 여기에서는 한 시간(h) 동안 내린 강우량이 100mm 이상인 강우, 즉 강우강도가 100mm/h 이상인 강우를 극한강우로 정의한다.

“ 22,426개 중 5개
소하천에만 계측
시설이 설치·운영 ”

평가 및 위험지역 피해저감을 위한 대책마련에 직접 활용하는 것은 물론 재난관리를 위한 종합계획수립이나 예방사업을 지원하는 재난관리 기술의 확보정에도 활용 가능하다.

지금까지 우리나라의 재난관리 기술 개발은 중·대규모 유역의 하류지역을 중심으로 이루어져 왔으며, 이들 기술을 검증하기 위한 계측시설 또한 중·대규모 유역의 하류지역에 집중적으로 설치해 왔다. 그 이유는 과거의 강우형태가 현재와 다르게 장기간 동안 전국 혹은 대규모 유역에 고르게 발생함에 따라 홍수피해가 유출이 집중되는 하류지역에서 주로 발생하였기 때문이었다. 이와 함께 대부분의 도시가 하류지역에 집중되어 발달된 것도 하나의 이유로 작용하였다. 그러나 최근의 강우형태는 국지적으로 극한강우가 발생하는 등 소하천과 같은 소규모 유역에서 피해가 증가하고 있는 것으로 나타났다. 특히, 2013년과 2015에는 소하천의 피해가 국가·지방하천의 피해 보다 크게 발생하는 등 향후에는 재난관리 대책마련과 기술 개발을 위한 계측시설 설치위치에 대한 변화가 요구된다.

2018년 기준으로 국가·지방하천의 수위 계측 시설은 2,739개소이며, 유량 계측 시설은 513개소이나, 소하천은 전체 22,426개 중 5개 소하천²⁾에만 계측시설이 설치·운영되고 있다. 이렇듯 소하천은 아직까지 미계측 하천이 많아 재난관리 대책을 수립하기 위해서는 중·대규모 유역 하류에서 계측된 자료에 기반하여 개발·검증된 모의기술을 그대로 사용하여야만 했다. 2016년말 행정안전부는 소하천에서 인명 피해를 저감하기 위한 비구조적 대책으로써 소하천 홍수 예·경보시스템을 개발하였다. 개발된 시스템에서는 소하천 유역의 홍수량을 구하기 위한 재난관리 기술로 하류의 계측자료가 존재하는 규모의 하천유역에서 개발·검증된 수치모형을 사용하였다. 수치모형으로 산정된 하류부 홍수량은 비우량법 등으로 상류 소하천 홍수량으로 변환되었으며, 단면자료 등과 함께 수리학적인 방법으로 수위를 산정하였다. 그러나 계측자료가 존재하는 규모의 유역 내에는 <표 2>와 같이 3~4개 정도의 소하천 유역이 존재하며, 더구나 이들 소하천 유역의 총합이 계측자료가 존재하는 유

2 서울시 인수천, 용인시 능막천, 여주시 운촌천, 울산시 중선필천 그리고 양산시 선장천의 5개 소하천에 자동유량계측기술이 설치되어 운영되고 있다.

“ 유역내 주요 지점의 특성을 파악할 수 있는 위치에 계측 시설 설치가 중요 ”

역면적에 비해 30-40% 정도 적은 것으로 나타나 기존의 계측자료를 이용하여 소하천 유역에 적합한 설계·예측기술을 개발하는 데는 한계가 있는 것으로 나타났다.

기후변화로 인한 극한강우 빈도와 집중호우의 발생지역 증가는 기존의 유역 하류 부에서 발생하던 피해를 유역 상류부에 위치한 소하천으로 전이시키는 등 홍수 피해 양상이 변화하였다. 이러한 변화에 대응하기 위한 재난관리 대책은 한정된 재원을 고려하여 전국적으로 일관성 있게 마련하기 보다는 피해가 집중되고 있는 상류에 위치한 소유역 단위의 지역공동체 중심으로 차별화된 대책을 마련하는 것이 보다 효율적이다. 이렇게 재난관리 대책을 소유역 단위로 차별화하기 위해서는 <표 3>에 제시된 것처럼 기존의 하류지역 중심의 계측방법과 차별화하여 소하천-지방-국가하천을 연계하여 유역내 주요 지점의 수리·수문특성을 정밀하게 파악할 수 있는 위치에 계측시설을 설치하는 것이 중요하다.

또한, 비교적 계측이 용이한 수위만을 계측하고 기 개발된 수위-유량 관계식으로 유량을 산정하는 현재의 계측 방법에서 동일한 계측지점에서 수위와 유속 그리고 유량을 실시간으로 계측하는 방법으로서의 전환이 요구된다. 그리고 부처별로 대상 시설물을 관리하기 위한 목적으로 특정 위치에 설치·운영하고 있는 계측시설을 재난관리 대책중심으로 전환하여 계측정보 간 효율적 연계가 가능한 위치에 설치하는 것이 필요하다. 마지막으로 계측된 자료가 재난관리 대책에 활용될 수 있도록 자료를 DB화하고 분석을 통해 정보화 하는 등 계측시설과 정보를 효율적으로 관리하도록 계측을 위한 독립 기구를 설치·운영하는 것도 필요하다.

〈표 2〉 유역특성 및 관측규모 비교(국립재난안전연구원)

| 항목 | 한강 유역 | 낙동강 유역 | 금강 유역 | 영산강 유역 | 기타 유역 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 유역 면적(km ²) | 41,974.25 | 31,785.04 | 17,924.83 | 7,604.94 | 10,151.33 |
| 유역 경사(%) | 28.395 | 34.23 | 21.59 | 23.98 | 25.89 |
| 연평균 강우량(mm/yr) | 1,708.50 | 1,072.50 | 1,146.40 | 1,228.30 | 1,615.05 |
| 유역 밀도(km/km ²) | 0.11-3.95 | 0.60-4.44 | 0.09-4.06 | 0.60-2.06 | 0.23-2.73 |
| 관측 유역 개수 | 1,689 | 2,268 | 953 | 267 | 2,116 |
| 소유역 개수 | 5,332 | 7,208 | 2,429 | 1,149 | 6,705 |

〈표 3〉 미래 기후변화에 대응하기 위한 계측방법의 변화 추이

| 현행 계측방법 | 미래 기후변화 대응 계측방법 |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 하류부 국가하천 중심의 계측 | <ul style="list-style-type: none"> 소하천-지방-국가하천을 연계하는 주요 지점 계측 |
| <ul style="list-style-type: none"> 강우, 수문, 수리 자료 별도 계측 | <ul style="list-style-type: none"> 강우-수문-수리 자료를 연계하는 종합계측 |
| <ul style="list-style-type: none"> 부처별 관리 대상(하천, 저수지 등) 중심의 계측 | <ul style="list-style-type: none"> 재난관리대책 중심의 통합계측 |

“ 흐름유속 계측
기술에는 접촉식과
비접촉식으로 구분 ”

III. 계측기술의 정의 및 분류

계측(Instrumentation)이나 측정(Measurement)은 어떤 양의 크기에 대응되는 수치를 결정해 적절한 형태로 나타내는 과정이다. 이런 측정을 가능하게 돕는 기술이 바로 계측기술이다. 계측기술의 3가지 주요 기능은 지시(Indication)와 기록(Recording), 제어(Control)이며, 계측방식은 크게 아날로그(Analog)방식과 디지털(Digital)방식의 두 가지로 나눌 수 있다. 아날로그 계측기술은 지침의 위치로 측정량을 연속적으로 표시기에 변환해 나타내기 때문에, 지침을 보는 방법에 따라 개인차가 생기기 쉬워 고정밀의 연속 측정에는 부적합하다. 이에 반해 디지털 계측기술은 측정치를 불연속적인 수치로 표시하는 방식으로 개인 오차가 없고, 고정밀의 측정이 가능한 장점이 있다. 특히 측정 결과를 계산 및 처리, 판단하고 정리하는 것이 가능해 현재 대부분의 계측에 사용되고 있다. 이밖에도 컴퓨터 시스템 내에서의 인터넷 원격 제어 기능 등을 활용해 쉽게 계측자료를 DB화하고 정보를 공유할 수 있다는 장점이 있다.

[그림 2] 소하천 흐름유속 계측기술별 장·단점 비교

| 측정 방법 | | 비용 | | | 계측안전성 | | 계측용이성 | | 자동화 | 확장성 |
|-------|------------|----|----|----|-------|-----|-------|-----|-----|-----|
| | | 장비 | 인력 | 유지 | 평수기 | 홍수기 | 평수기 | 홍수기 | | |
| 접촉식 | 프로펠러 유속계 | 5 | 1 | 4 | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| | 초음파도플러 유속계 | 1 | 3 | 3 | 5 | 2 | 5 | 1 | 5 | 5 |
| | 인공추적자 유속계 | 3 | 2 | 5 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 부자 유속계 | 4 | 2 | 4 | 1 | 4 | 1 | 4 | 5 | 2 |
| 비 접촉식 | 전자파 표면유속계 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| | 입자추적 유속계 | 3 | 5 | 3 | 2 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| | 표면영상 유속계 | 3 | 5 | 3 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| | 레이다 유속계 | 1 | 2 | 2 | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 |

현재 수위와 함께 하천 유량 산정에 있어 필수적으로 요구되는 흐름유속을 계측하는 기술은 [그림 2]와 같이 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수 있는데, 접촉식은 계측기를 물에 직접 접촉하여 유속을 계측하는 방법이고 비접촉식은 계측기가 물과 일정 거리를 유지하면서 흐름을 따라 이동하는 물질이나 흐름파동을 분석하여 유

“ 비접촉식 유속계는
홍수/비홍수기 모두
계측이 가능 ”

속을 계측하는 방법이다. [그림 2]는 유속계 각각의 장·단점을 5단계로 구분하여 수치와 색으로 표시한 것으로써 그 값이 5(붉은색)에 가까울수록 적용성이 높은 방법이고, 1(푸른색)에 가까우면 적용성이 낮은 방법이라고 할 수 있다.

접촉식 유속계 중 프로펠러 유속계, 부자식 유속계는 여전히 많이 사용되고 있는 계측기이다. 이들 유속계들은 비용이 저렴하고 사용이 쉽다는 장점이 있음에도 계측결과가 연속적이지 못하고 계측자료의 전송과 신뢰성 저하 등에 문제가 있다. 이에 대한 대안으로 초음파도플러유속계(Acoustic Doppler Current Profiler)와 인공추적자유속계(Artificial Tracer Velocimeter)가 개발되어 하천 흐름유속계측에 많이 사용되어 왔다. 그러나 인공추적자유속계는 방사성물질이나 염료와 같은 인공물질을 사용하여 유속을 계측하는 방법으로써 사람이 물에 직접 들어가지 않고도 유속을 쉽게 계측할 수 있는 장점이 있음에도 불구하고, 하천에서 사용허가를 얻는 것이 어려워 최근에는 거의 사용하지 않는 방법이다.

초음파도플러유속계는 사람이 물에 직접 들어가서 유속을 계측할 수도 있고, 배나 이동이 가능한 장치에 부착하여 물에 직접 들어가지 않고도 유속을 계측할 수 있다는 장점이 있다. 국내에서는 한국수자원조사기술원이 초음파도플러유속계를 활용하여 국가·지방하천에서 연평균 95% 정도의 신뢰도 높은 수위, 유속 자료를 취득하는 등 현재 가장 많이 사용되고 있는 계측기이다. 그러나 이들 접촉식 방법은 많은 장점에도 불구하고 홍수 시 빠른 유속으로 인한 계측의 안전성 문제와 부유물에 인한 고가의 계측장비 손상 우려 때문에 소하천에서는 사용에 제한이 있다.

비접촉식 방법에 주로 사용되는 유속계로는 전자파표면유속계(Microwave Water Surface Current Meter), 입자추적유속계(Particle Tracking Velocimetry), 표면영상유속계(Surface Image Velocimetry), 레이더유속계(Raider Velocimetry) 등이 있다. 이들 비접촉식 방법에 사용되는 계측기들은 홍수기나 비홍수기 모두 계측이 가능하다는 장점이 있다. 전자파표면유속계는 교량 상부나 제방에서 표면유속을 계측하는 것이 가능해 홍수 시에도 비교적 안전하게 유속을 계측할 수 있는 장점이 있다. 그러나 특정 지점에 대한 표면유속을 계측할 때 이동하며 계측을 수

“ 표면영상유속계는
실시간, 자동화
계측이 가능 ”

행할 경우 계측시간이 많이 소요될 뿐만 아니라, 반복적으로 계측을 수행할 경우 동일 계측지점을 확보하는데 어려움이 있어 계측결과의 신뢰도가 저하되는 단점이 있다. 레이더유속계는 고가의 비용이 요구되며, 위성자료를 이용한 계측은 이미지의 해상도 문제로 소하천과 같은 소규모 유역의 흐름유속을 계측하는 데는 한계가 있다.

최근에 와서는 입자추적유속계와 표면영상유속계가 비접촉식 방법으로 많이 사용되고 있는데, 입자추적유속계는 흐름 표면의 입자이동거리를 시간으로 나누어 유속을 계측하는 방법으로 입자의 이동이 없는 맑은 물에서는 유속계측이 어려운 단점이 있다. 더불어 입자가 불규칙하게 분포할 경우 유속계측 간격이 고르지 않아 단면평균유속을 구하는데 있어 신뢰도가 저하되는 단점이 있다. 이에 반해 표면영상유속계는 흐름표면의 이미지 변화를 이용하여 유속을 계측하므로 계측격자와 계측시간을 조정하는 것이 가능해 보다 신뢰도 높은 단면평균 유속을 구하는 것이 가능하다. 더불어 표면영상유속계는 실시간 유속계측이 가능하고 이를 단면자료와 함께 단면평균유속으로 환산할 경우 수위와 함께 기계적으로 유량을 계측하는 등 자동화가 가능하다는 장점이 있다.

IV. 소하천 계측기술

소하천은 유역면적이 작고 경사가 급하며 하천길이가 대부분 2km 이내로 짧아서 내린 강우가 1시간 이내에 모두 하류로 유출되는 등 하류부에 위치한 국가·지방하천과는 차별화된 홍수 유출특성을 가지고 있다. 이러한 이유로 프로펠러유속계와 초음파도플러유속계를 이용하여 물에 직접 들어가서 계측하는 접촉식 방법은 안전성 문제 때문에 낮은 수심에서만 계측이 가능하다. 즉, 수위가 급격히 상승하는 소하천에서 이들 방법을 사용할 경우 매우 짧은 시간 동안에만 계측이 가능해 침투 홍수량을 계측하는데 한계가 있다. 실사 교량위에서 보조계측장비를 이용하여 물에 직접 들어가지 않고 계측을 수행한다고 하더라도 부유물이 계측기에 걸려 계

“ 국립재난안전연구원은
표면영상유속계와
CCTV 활용한 자동
유량계측기술 개발 ”

측에 단절이 발생하거나 소류사나 부유물 등이 계측기에 부딪혀 장비를 손상시키는 등의 문제가 있어 소하천의 홍수량 계측에는 부적합하다. 부자유속계는 물에 직접 들어가지 않고 계측을 수행할 수 있어 홍수 시에도 계측이 가능하나 계측을 수행하기 위해서는 일정길이의 직선구간과 계측에 필요한 안전한 장소를 확보하는 것이 중요한데, 소하천은 만곡구간이 많고 하상에 식물이 자라는 구간이 많아 계측에 적합한 장소를 확보하기가 어려우므로 계측에 세심한 주의가 필요하다.

접촉식 방법은 이러한 문제들 이외에도 계측을 위해서는 최소한 3-4명의 계측 인력이 요구되는데, 22,426개에 달하는 국내 소하천 관리를 수행하고 있는 지자체 담당공무원의 수가 절대적으로 부족하여 기존의 인력중심 계측장비로는 수위, 유속 그리고 유량 계측 및 관련 자료를 관리하는데 한계가 있다. 더 나아가, 소하천에 계측기술을 확대하고 계측자료를 지속적으로 수집하는데 있어서도 시간과 인력이 소요되는 접촉식 방법은 지속적인 계측에 한계가 존재한다. 따라서 국내 소하천의 흐름특성이나 담당공무원의 수를 고려할 때 최소한의 인력으로 물에 직접 접촉하지 않고서도 유량을 계측할 수 있는 비접촉식 계측기술이 적합하다고 할 수 있다.

국립재난안전연구원은 적은 인력으로도 소하천의 홍수량을 계측하고 계측정보를 손쉽게 관리할 수 있도록 비접촉식 방법 중 장점이 가장 많은 표면영상유속계를 자동화하여 CCTV 기반 자동유량계측기술을 개발하였다. 본 기술은 [그림 3]과 같이 표면영상유속계를 사용하여 CCTV 동영상으로부터 실시간 표면유속분포를 계측하고 초음파수위계로 계측한 수위와 함께 기 구축된 유속지수를 반영하여 실시간으로 단면평균유량을 계측하는 기술이다. 국립재난안전연구원은 2020년 현재 5개 시범소하천에서 자동유량계측기술을 설치하고 계측자료를 수집하고 있으며, 2016년부터는 시범소하천에서 저유량 조건에 한해 접촉식 계측방법으로 수위, 유속, 유량을 직접 계측하고 자동유량계측기술의 정확도를 검증하였다. 검증 결과 자동유량계측기술은 계측 정확도가 90% 이상으로 높으며, 실시간 계측이 가능해 침투 홍수량을 계측하는데 유리한 것으로 나타났다. 더불어 설치가 용이하고 비용이 저렴하다는 장점이 있어 향후 소하천에 확대 적용한다면, 소유역 맞춤형 재난관

“ 자동유량계측기술
적합성 평가를 매년
진행 중 ”

리 대책을 수립하는데 있어 그 기여도가 클 것으로 기대된다. 특히, 실시간 CCTV 영상은 소하천 재난 상황관리 측면에서 소하천에 직접가지 않고도 흐름관측 등 현장 상황판단이 가능하다는 큰 강점을 지니고 있어 다방면으로 활용 가능한 기술이라고 판단된다.

[그림 3] 자동유량계측기술 개념도 및 중선필천 설치 사례도



행정안전부는 자동유량계측기술을 확대 구축하기 위하여 위험도평가와 지자체 수요조사 결과를 토대로 약 10%인 2,200여개 적정 소하천을 선정하였다. 지자체는 자동유량계측기술 설치를 추진 중에 있는데, 국립재난안전연구원은 설치를 지원하기 위하여 CCTV, 수위계 및 자동유량계측을 위한 컴퓨터 제원 등을 포함한 장비표준과 설치표준을 개발하여 제공하고 있다. 설치표준에는 흐름방향에 장애물이 없는 지점, CCTV를 설치하여 하천의 흐름을 전체적으로 촬영이 가능한 지점, 태양 고도가 낮을 경우 태양 빛의 수면 반사가 적은 지점, 영상 내 수면파문이 잘 보이는 지점 등을 제시함으로써 자동유량계측기술 설치에 적합한 위치를 제시하고 있다.

국립재난안전연구원은 매년 현장방문을 통해 지자체가 요청한 소하천이 자동유량계측기술 설치에 적합한지를 정량적으로 평가하고 있다. 현장지원에서는 먼저 과거 피해이력, 하천 특성 등 적정성을 평가하고 하천 내 시설물, 주변 공동체, 지역 대

“ 소하천의 유량 계측 정보를 하류의 홍수 피해저감 등 다양한 분야에 활용 가능 ”

표성을 종합적으로 고려하여 시범소하천으로서의 적합성을 평가한다. 이때 전원공급 및 통신 연결이 가능하지 않은 곳이나 여울이나 사수역 등에 의해 흐름이 편향되고 하천이나 관거가 합류되어 흐름이 안정적이지 않은 곳은 선정에서 제외한다. 선정된 소하천에 대해서는 자동유량계측기술을 설치하기 위한 적정위치를 결정한다. 적정위치는 흐름방향에 장애물이 없는 지점, CCTV를 설치하여 하천의 흐름을 전체적으로 촬영이 가능한 지점, 태양 고도가 낮을 경우 태양 빛의 수면 반사가 적은 지점, 영상 내 수면파문이 잘 보이는 지점 등을 고려하여 결정한다. 현재까지 국립재난안전연구원은 대구, 세종, 경기 등 10개 시도 내 54개 시군이 신청한 116개 소하천(2018년 36개 소하천, 2019년 50개 소하천, 2020년 27개 소하천)에 대해 현장지원을 수행하였다. 현장지원을 통해 10개의 소하천을 제외한 106개의 소하천을 자동유량계측기술 설치에 적합한 시범소하천으로 선정하였으며, 이들 소하천에 대해서는 기술을 설치하기 위한 적정위치도 함께 결정하였다. 최종 선정된 106개 시범소하천은 60% 이상이 유역 면적 1km² 이상에서 5km² 미만이고 하천연장은 1km 이상에서 5km 미만에서 분포하는 것으로 나타났다.

이들 소하천은 지방하천과 국가하천의 상류에 위치하고 있어 자동유량계측기술이 설치되면 계측정보를 하류 하천의 홍수 피해 저감에 직접 활용하는 것은 물론 예경보시스템 개발, 예방·복구사업 등 적정대책 마련을 위한 기술개발 및 검증에 활용하는 것이 가능할 것으로 기대된다. 특히, 소하천은 유출 속도가 빨라 인명피해를 저감하기 위해서는 예측기술이 중요한데, 계측 수위·유량을 기상청에서 제공하는 예측 강우와 함께 활용할 경우 강우-유량, 강우-수위 노모그래프 개발이 가능하고 이렇게 개발된 노모그래프는 실시간 소하천 홍수 예경보에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

자동유량계측기술은 CCTV와 수위계만을 이용하여 유량을 계측함으로써 설치 및 운영이 용이하고 극한홍수 시에도 실시간으로 유량을 계측함은 물론 하천 상황을 모니터링 할 수 있다는 큰 장점이 있다. 그러나 단면평균유량을 계측함에 있어 표면유속을 평균유속으로 환산하기 위한 검증과정이 수반되어야 하고 바람에 의한

흔들림이나 빗방울에 의한 계측오차 보정 등이 필요하므로 계측기술을 설치함에 있어 장소선정과 장비검정(Calibration)에 세심한 주의가 요구된다.

참고문헌

- 국립기상과학원, 2018: 한반도 100년의 기후변화, 31pp.
국립재난안전연구원, 2017: 실증실험기반 시설물 안전기준 개발(II), 103pp.
국립재난안전연구원, 2019: 소하천 재난안전기준 개선을 위한 자동유량계측기술 고도화, 104pp.
국민안전처, 2016: 중소하천 홍수 예경보 체계 구축/중소하천 홍수 예·경보 통합모형, 60pp.

돌발 기상 예보와 과제

이우진 이화여자대학교 초빙교수 wjlee1977@ewha.ac.kr

- I. 적운 대류와 돌발 기상
- II. 예측성과 기술 환경
- III. 향후 과제

기상 기술의 발전에도 불구하고, 중규모 대류계에서 비롯한 강한 강수, 뇌전, 우박, 돌풍의 특보 선행 시간과 예측성을 확보하기는 어려운 일이다. 중규모 대류계에 대해서는 아직도 이론적으로 모르는 부분이 적지 않고, 관측 자료가 가진 중소규모 정보를 수치모델에 반영하는 데에도 어려움이 따르기 때문에, 수치모델, 자동추적기법(nowcasting), 인공지능학습, 그리고 이들을 섞은 하이브리드기법이 사용되고 있다. 하지만 이들 방법에도 인력·기술 등 가용자원의 부족으로 한계가 존재하는 상황이다. 이에 본 고에서는 예보현장에서 적용할 수 있는 실용적인 해법으로 첫째, 시스템의 관점, 둘째, 학습의 관점, 셋째, 소통의 관점으로 나눠 접근해 보았다. 시스템과 학습 관점이 공급자의 관점이라면 소통은 수요자의 관점의 해결책이다. ■



1. 적은 대류와 돌발 기상

한 여름 찜통더위로 찌든 찰나에 한 줄기 시원한 바람이 불어오면 온 몸에 생기가 돈다. 하지만 그 돌풍을 일으킨 먹구름 아래에서는 세찬 소나기가 내리면서 저지대가 침수되거나 여지저지 비를 피해 움직이는 행인의 발길이 있을지도 모른다. 소나기는 돌발(突發) 기상의 한 단면이다. 갑자기 구름이 하늘을 덮고 이내 곧 비가 오더니 어느새 구름사이로 햇살이 내미는 것은 온전한 축에 속한다. 깊게 발달한 구름에서 시간당 30mm 이상의 강한 비가 쏟아지고, 천둥·벼락과 함께 우박이나 광풍이 몰아치면 손 쓸 사이도 없이 피해를 당할 수밖에 없다.

돌발 기상현상은 대부분 대기가 불안정하여 대류 활동이 활발한 곳에서 일어난다. 여기에 수증기가 보태지면 부력을 받아 구름이 연직으로 깊게 발달한다. 구름 내부의 수적이나 빙정이 수 mm 이상으로 충분히 성장하면, 떠받치던 상승기류가 중력을 이겨내지 못해 액체 또는 고체 형태의 강수 입자가 되어 지상을 향해 낙하한다. 강수 입자가 하강하는 동안 증발이 일어나 주변 공기가 차가워지는데, 하강하는 강수가 끌어 내리는 마찰력이 가세하여 강수 지역에는 찬 공기가 하강하게 된다. 하강한 찬 공기는 지상 부근에서 사방으로 퍼져 돌풍 전선을 형성하기도 한다. 대류가 활발할수록 강수와 돌풍도 강해지고, 때로는 뇌전과 우박을 동반하기도 한다. 이상적인 소나기구름에서는 연직 대류가 상하로 열을 고르게 분배하여 하강 기류가 부력을 저지하게 되면 강수는 그치고 대류 활동이 쇠약해져 하나의 생애를 마치게 된다.

기상 관측자는 소나기구름을 적란운(cumulonimbus)으로 분류한다. 적란운 세포는 일련의 생애를 가진 소나기구름의 최소 단위다.

적란운에 동반한 돌발 기상현상은 시·공간 규모와 관련이 있다. 적란운 세포의 수명은 한 시간이 채 되지 않는다. 한 나절 안에 여러 번의 적란운 주기가 지나갈 수 있어 이 경우 날씨변화가 심하다. 또한 한 시간 안에 강한 비나 눈구름이 발달하여 내리는 경우도 있다. 돌발성은 국지성과도 통한다. 적란운 세포가 점유한 영역은 직경 10km보다 작아, 서울광역시 면적 안에 열 개 이상의 적란운 세포가 끼어들 수 있다. 한 구에 소나기가 오더라도 다른 구에서는 햇빛이 짹짹할 수도 있다. 여름철 집중호우 강수량이 서울 안에서도 구(區)별로 들쭉날쭉한 이유다.

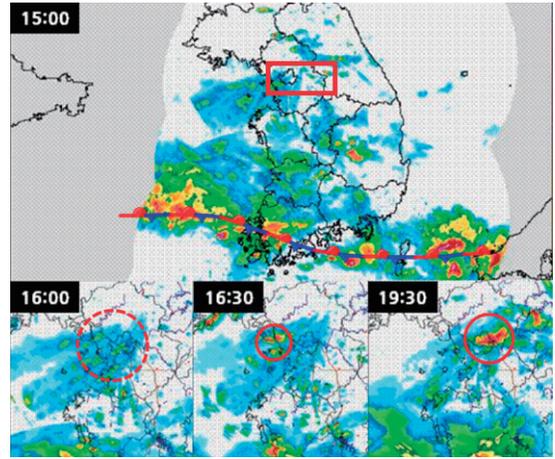
하나의 적란운 세포는 발달 강도에 따라 크기가 2-20km로 다양하다(meso-). 세포끼리 연합하여 무리를 이루면 20-200km의 중규모 대류계(meso-)를 이루기도 하고, 1,000 km까지 더

큰 규모(meso-)로 확장하기도 한다(Lee and Kim, 2007). 대류계안에서 새로운 세포가 계속 발생할 경우 개별 세포가 30분 내에 소멸한다 하더라도 전체 시스템의 수명은 수 시간 이상 연장될 수도 있다. 중규모 대류계는 본질적으로 적란운 세포로 구성되어 있어, 돌발적이고 국지적인 적란운의 고유한 특성을 고스란히 내보인다.

매년 여름철이 되면 발달한 적란운 세포나 중규모 대류계가 크고 작은 피해를 유발한다. 추석 전날 서해상에서부터 수도권까지 길게 늘어진 강수대가 정체하며 몇 시간 동안 200mm 가까운 비가 쏟아지며 광화문 일대가 침수된 적이 있다. 수락산 능선에 벼락이 치며 쇠로 만든 안전줄을 잡고 등반하던 행락객이 사고를 당한 적도 있었다. 제주에서 김포로 향하던 여객기가 우박을 맞아 선체 앞부분이 떨어져 나간 아찔한 사고도 있었으며, 당산 제철 부근에 토네이도에 가까운 강풍이 몰아쳐 시설물의 피해가 잇따르기도 했다. 이는 중규모 대류계와 관련된 기상 재해의 한 단면을 보인 것으로, 피해 사례는 셀 수 없이 많다.

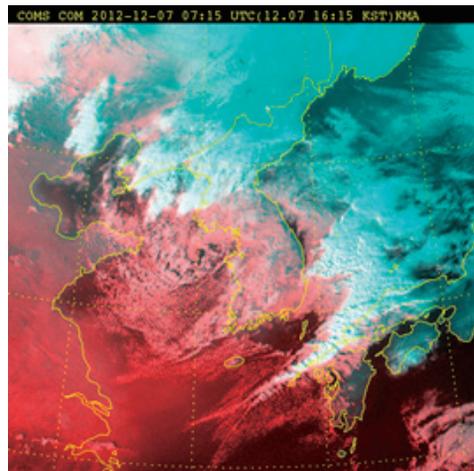
중규모 대류계는 비단 여름철에만 국한하여 발생하지 않는다. 겨울철 대륙 고기압이 장출하여 한기가 우리나라 해상으로 이동해 오면 차가운 공기와 상대적으로 따뜻한 해수가 만나 난류가 일어나고, 해면에서부터 온습한 공기로 채워지며 안정했던 경계층이 허물어져 키가 낮은 적란운이 발달한다. 드

[그림 1] 레이더 영상에 나타난 경기 동부 지역의 국지성 호우. 2013.7.4.20:00~24:00 전후, 동그라미 지역을 중심으로 약 170mm의 강수량 기록



출처: 기상청

[그림 2] 2012.12.7. 서해상에서 해기차에 따른 대류성 난구름이 중규모 대류계로 발전한 모습. 천리안 위성 가시채널과 적외채널 합성 영상



출처: 기상청



물기는 하지만 천둥과 번개를 동반하기도 한다. 이때 지형적 요인으로 수렴 기류가 형성되면 수렴선을 중심으로 적란운이 조직화되며 운열이 두터워지고 보다 큰 운동계로 발달할 수 있다. 또한 상층 기압골이 접근하면 하층의 구름대와 상호작용하여 태풍과 흡사한 나선형 구름대로 발전하여 단시간 폭설의 원인이 된다.

II. 예측성과 기술 환경

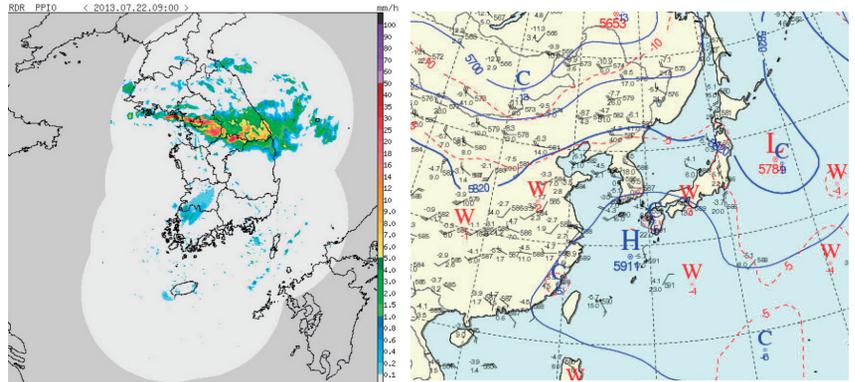
기상 기술의 발전에도 불구하고, 중규모 대류계에서 비롯한 강한 강수, 뇌전, 우박, 돌풍의 특보 선행시간과 예측성을 확보하기는 어려운 일이다. 단순히 통계적으로 생각해 보더라도 돌발적인 특성이 현저할수록 드물게 발생할 수밖에 없고 표본이 작아 예측성이 낮아질 수밖에 없다. 이 점은 주요 기상기관에서 강수량의 등급이 높아질수록 예보 정확도가 떨어진다는 점에서도 알 수 있다. 발달한 적란운에서는 강한 강수 외에도 뇌전, 우박, 돌풍을 동반하고, 이러한 재해성 기상현상의 예측성도 낮은 수준이다.

돌발 기상은 통념을 벗어난 예외적인 상황에서 발생하는 경우가 많다. 흔히 저기압 주변에서 굵은 날씨가 나타나고 고기압 주변에서는 무난할 것으로 짐작하는 것은 상식이다. 고기압 주변에서는 하강기류가 우세하고 대기가 안정해서 대류 운동이 저지되기 때문이다. 경계층 상부에는 역전층이 강해 경계층의 기류가 자유 대기로 나아가기 어려운 구조다. 하지만 경계층에 계속 수증기가 공급되는 여건이라면 사정은 달라진다. 역전층이 뚜껑이 되어 하층의 수증기가 확산하지 못하게 막는 역할을 하므로 경계층의 좁은 공간에 수증기가 촘촘하게 쌓일 수 있기 때문이다. 그러다가 갑자기 역전층이 해소되면 경계층에 가두어둔 엄청난 잠열 에너지가 일거에 연직으로 재분배 되면서 단시간에 강한 적란운이 발달한다. 따라서 역전층이 강할수록 돌발 기상의 발생 가능성은 낮아지지만, 그만큼 많은 에너지가 축적되기 때문에 일단 역전층이 풀리면 한꺼번에 엄청난 에너지를 분출하는 것이 재해의 공통적 속성이다.

북태평양 고기압 가장자리는 역전층이 시소 역할을 하는 대표적인 기압 배치다. 남서풍을 따라 서해상으로 진입한 하층 기류는 고기압 가장자리를 따라 안정한 대기층에 쌓이다가 대기 안정도가 떨어지면 깊은 적란운으로 발달한다. 통상 이러한 기압배치에서는 상하층의 풍

향이 크게 다르지 않아 적란운 강수 띠는 중층 지향류를 따라 선상으로 좁은 구역에 정체하며 집중호우를 유발하는 경우가 많다. 남서풍 하층 제트가 형성되면 기압계만으로도 호우 가능성을 짐작할 수 있지만, 장마 전선이 소강상태를 보이는 국면에서 심야에 급격히 적란운이 발달하는 경우는 시점과 위치를 예측하기 어렵다.

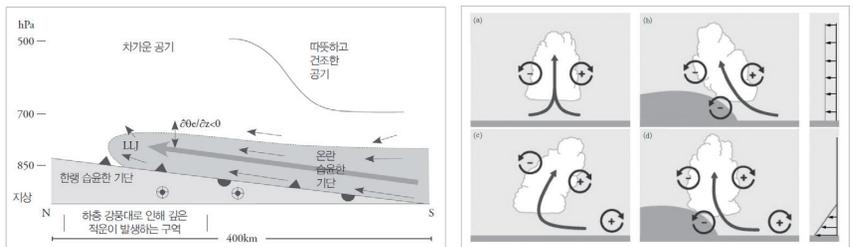
[그림 3] 2013.7.22.09:00 레이더 영상(좌)과 500hPa 고도장 일기도(우). 북태평양 고기압 가장자리에 놓인 경기 동부지역에서는 띠 모양으로 중규모 대류계가 발달하며 전날 오후부터 하루 동안 300mm가 넘는 집중호우 발생



출처: 기상청

우물에서 물을 끌어올리려면 마중물이 필요하듯이, 적란운이 발달하려면 하층에서 공기를 위로 끌어올려주는 힘이 필요하다. 경계면(boundary)은 적운 대류의 방아쇠 조건을 구성하는 주요 요소 중 하나다. 경계면 주변에서는 기류가 수렴하는 경우가 많고, 자연스럽게 상승하는 기류는 불안정한 대기가 하층에서 자유 상승 고도(LFC)까지 진입하는데 도움을 준다. 하층의 강풍대(low level jet)가 경계면에 부딪혀 사면을 따라 활승하면 [그림 4]의 좌측 모식도와 같이 상승 대류(elevated convection)가 유발된다. 바람이 산비탈에 부딪히면 사면을 따라 상승하듯이, 한기 위로 난기가 강하게 밀면 전선면을 따라 상승하게 된다. 온대저기압 주변에서는 전선면의 구분이 뚜렷하지만, 여름철에는 한란의 경계가 분명하지 않고 적란운에서 유도된 한기 풀이 섞여 중

[그림 4] 상승 대류(elevated convection)에 의한 적운 발달 과정(좌), 한기 풀(cold pool) 과 연직 시어의 소용돌이도 균형과 적운 발달 조건(우)



출처: 이우진 2017 & 2019

유도된 한기 풀이 섞여 중

대기



규모 경계면 분석이 어렵다. 야간에 특히 강해지는 하층 제트도 면밀한 분석이 필요하다. 적란운의 하강 기류에서 빠져나가는 한기 풀과 마주치는 맞바람의 시어가 균형을 이룰 때는 [그림 4]의 우측 그림과 같이 경계면에서 새로운 적란운 세포가 형성되기 유리하다.

중규모 대류계를 수치 모의하려면 모델 초기장에서 하층 수증기 흐름과 한기 풀이 제대로 드러나야 한다. 종관 관측망에서 기압골 주변의 대규모 전선대는 포착하지만, 중규모 경계면은 잘 잡히지 않는다. 지상 관측망은 상대적으로 촘촘하게 짜여 있지만, 지면 부근의 난류 특성과 지형 특성을 모델이 충분히 소화하지 못하기 때문에 지상관측자료로 경계층의 기상장을 유추하는 데에는 한계가 있다. 기상위성과 기상레이더의 원격 탐측자료는 사-공간적으로 조밀하지만, 그 나뉠대로도 한계가 있다. 기상레이더의 도플러 시선 속도는 직접적으로 하층 기류를 대변하지만, 관측 전략에 따라 사각지대가 존재하고, 펄스 주파수와 출력에 따라 다양한 형태의 탐측 오차를 보정하는데 많은 노력이 필요하다. 반사도는 강수 강도를 통해서 구름층의 잠열을 추정하는데 유용하지만, 잠열과 균형을 이루는 하층의 바람장을 재구성하는데 어려움이 따른다. 또한, 극궤도 기상위성의 마이크로파 채널은 구름층 아래쪽의 기온과 습도를 추정하는데 유용하지만, 구름에 따른 복사 잡음을 여과하는데 여전히 많은 노력이 필

요하다. 고해상도 정지궤도위성의 대기 운동벡터는 복잡한 변수 변환과정을 거치지 않고 바로 모델 변수로 치환할 수 있는 장점에도 불구하고, 고도 할당 오차와 지면 영향에 따른 복사 오염의 문제를 풀어내는 것이 도전적이다. 연직 측풍 관측(wind profiler)은 시간적으로나 연직적으로 세밀한 바람장을 제시하기는 하지만 위성이나 레이더의 자료동화 효과를 얼마나 보완해 주는지는 좀 더 연구가 필요해 보인다. 일부 수치예보센터의 국지 자료동화 실태는

〈표 1〉 국지 자료동화 시스템 활용 사례

| Group | Methods | Incr. res. | Other DA comp. |
|----------------------------------|--|------------|--|
| Meteo-France HIRLAM ALADIN | 3D-Var; Berre(2000) statistical balance; EDA for BGE stat. | 1.3-2.5km | Bayesian retrieval of hum. profiles from radar refl. |
| COSMO | KENDA (LETKF): Adaptive multipl. and addit. Inflation; RTPP; Adapt. localization | 2.2-2.8km | Hydrost. Bal. Latent Heat Nudging |
| Met Office | Incr. 4D-Var; Stat. bal.; Lagged NMC for BGEs | 4.5km | Jc-DFI Latent Heat Nudging |
| NOAA CONUS NAM | Hybrid incr. 3DEnVar NMC for BGEs | 9.0 km | Cloud analysis + Latent Heat Nudging |
| NOAA HRRR | Hybrid incr. 3DEnVar NMC for BGEs | 12.0 km | -"- -" |
| JMA MMA | Incr. 4D-Var; NMC for BGEs | 15.0 km | Jc-DFI Bayesian retr..... |
| JMA LMA | 3D-Var; NMC for BGEs | 5.0 km | Soil control variab.! |

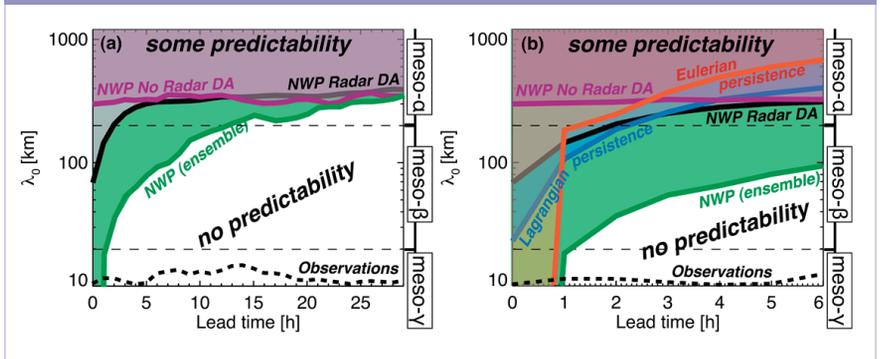
출처: 기상청, 2018

〈표 1〉에 제시하였다(Gustafsson et al. 2018).

중규모 대류계에 대해서는 아직도 이론적으로 모르는 부분이 적지 않고, 관측 자료가 가진 중소규모 정보를 수치모델에 반영하는 데에도 어려움이 따르기 때문에, 자동추적기법(nowcasting)을 병행하는 현장 기관이 많다. 수치모델이 유체역학 이론 위에 관측자료를 끼워 넣는 것이라면, 자동추적기법은 관측자료를 기반으로 그때그때 모델을 구성하는 것이다. 넓은 시야에서 보면 빅데이터에서 정보를 추출하는 방식이라 볼 수도 있고, 이 점에서 인공지능 학습이 용이한 방식일 수도 있다. 바로 몇 시간 전의 레이더 반사도 동영상이나 위성 구름 영상의 동영상을 통계적으로 분석하거나 기계적으로 학습하여 몇 시간 앞의 동영상을 구성하는 것이 대표적인 사례이다. 이 방식의 문제점은 제한된 관측 표본을 통해서 대기 운동의 복잡한 비선형성과 서로 다른 규모간 상호작용을 충분히 모사하기 어렵다는 점이다. 자동추적기술은 중규모 수치모델이 취약한 1-3시간 앞의 강수대를 예측하는데 유용하지만, 예측 기간이 그 이상으로 늘어나면 역학적 강제력을 대변하는 수치모델에 비해 예측 오차가 커지는 경향이 있다(그림 5). 기상위성과 레이더 자료를 동화한 초기장의 효과도 1-3시간이 지나면 빠르게 소멸된다는 것도 유사한 맥락에서 이해해 볼 수 있겠다. 향후 인공지능기술을 적용하여 어디까지 자동추적기술이 발전할 지는 미지수이지만, 당분간은 수치모델과 자동추적 모델을 병행해 가면서 양자의 장점을 예측 시간대별로 취사선택(blending)하는 하이브리드 방식이 현실적인 해법이 될 것이다.

서로 다른 시간 구간의 이질적인 예측자료를 하이브리드 방식으로 바로 섞게 되면 흔히 불연속이 나타난다. 하지만 확률 공간에서 합치면 이 문제를 완화

그림 5 선행 시간(leadtime)과 운동 규모(km)에 따른 예측성 비교(Surcel et al. 2015). +30시간의 예측성(좌), +6시간의 예측성(우). 점선은 관측 실태, 실선은 예측성(NWP(ensemble): 레이더 자료를 동화한 모델 앙상블, NWP radar DA: 레이더 자료를 동화한 결정론적 모델, NWP No Radar DA: 레이더 자료를 사용하지 않은 결정론적 모델, Lagrangian Persistence: 패턴의 체계적 이동을 고려한 자동추적 모델, Eulerian Persistence: 패턴의 이동을 무시한 단순 추적 모델)





할 수 있다. 현장의 수치예보센터에서는 앙상블 기법을 이용하여 예측확률을 먼저 계산하고, 서로 다른 시간 구간의 예측확률을 섞어 초단기에서 단기 사이에 이음새 없는(seamless) 예측자료를 지원하고 있다. 먼저 자동추적모델의 학습자료, 분석기법, 작동인자를 다르게 설정하여 초단기 예측 앙상블을 구성하고, 예측확률을 계산한다. 다음으로 중규모 수치모델의 초기조건, 경계조건, 물리과정을 다르게 설정하여 단기에측 앙상블을 구성하고 마찬가지로 예측확률을 계산한다. 최종적으로 예측 시점별로 두 예측확률의 가중평균을 취하는 방식이다(Schaumann et al. 2020). 여러 종의 예측 앙상블에서 최적의 조합을 찾는 것은 빅데이터 탐색의 문제다. 이는 기계학습을 통해서 효과를 볼 수 있는 분야다. 다만 고해상도 예측 앙상블을 구성하려면 일반적으로 계산비용이 많이 필요하여 현실적으로 표본오차의 문제가 크고, 이 문제는 고스란히 앙상블 예측자료의 편이(bias)로 전이된다는 점은 여전히 안고 가야할 숙제다.

III. 향후 과제

중규모 대류계의 예측기술을 발전시키기 위해서는 물리적 메커니즘을 규명하는 이론과 함께 수치예측 기술과 비종관 관측자료 동화 기술이 뒷받침되어야 한다. 이 분야의 전문가들이 한데 모여 체계적인 연구를 제안한 국립연구위원회의 기획보고서를 살펴보면 미국은 이미 1980년대 이전부터 예측기술을 발전시키기 위해 많은 관심과 투자를 해 왔음을 짐작할 수 있다(NRC, 1990). 물론 미국은 토네이도가 중규모 재해성 기상들 중에서 상당한 비중을 차지하므로 우리와 여건이 같다고는 할 수 없지만, 여름철 집중호우 측면에서는 공통 관심사도 적지 않다. 그간의 투자와 노력에도 불구하고 미국 기상청이 집계한 호우예측 정확도는 더디게 개선된 편이다(그림 6). 역학이론과 수치모델 기술이 진보하는 동안에도 돌발 기상재해는 계속 일어날 것이므로, 예보현장에서는 실용적인 해법을 함께 강구해 나갈 필요가 있다. 향후 과제는 크게 3가지 관점에서 정리해 보았다. 첫째, 시스템의 관점이다. 둘째, 학습의 관점이다. 셋째, 소통의 관점이다. 첫째와 둘째가 공급자의 관점이라면 셋째는 수요자의 관점이다.

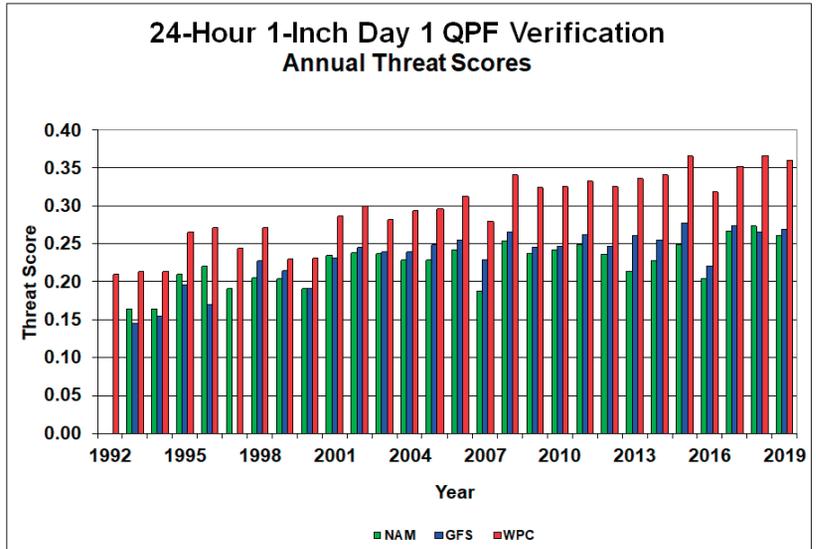
가. 시스템의 관점

실무 현장에서 중규모 기상현상의 예보기술이란 장님이 코끼리를 만지는 것과 유사하다. 여러 가지 기술이 동원되지만 중규모 현상의 어느 부분에서는 도움이 될 수 있어도 전체적인 퍼즐을 맞추기에는 역부족이다. 예보 담당자의 지식과 경험을 정돈한 개념 모델, 중규모 수치모델, 비

선, 초단기 자동추적모델, 그리고 이것을 다양하게 엮어 구축한 앙상블 예측기술은 나름 장점과 한계를 갖고 있다. 예측기법이 제공하는 자료량이 방대하고, 상호 중복적인 부분도 없지 않아 그날의 주요 재해성 기상현상에 초점을 맞춰 핵심자료만을 예보 담당자에게 지원해주는 종합적인 기술시스템이 필요하다.

돌발성이 강한 기상현상일수록 상황에 대응하여 조치하는데 더 많은 시간을 빼앗기고 예보에 판단할 시간은 거의 없거나 매우 부족하다. 야간이나 연휴 기간에 기상재해가 일어나면 지원인력도 부족하다. 더구나 피해가 발생하기 시작하면 언론과 관계기관의 관심이 급격히 증가하여 소통업무에 그나마 남은 일손마저 빼앗긴다. 돌발 기상현상이 발생하기 전에 예보판단 수칙에 따라 그날의 주요 기상요인을 감시하다가 예상과 비슷한 흐름으로 상황이 진행하면 다행이지만, 예상을 빗나가 상황이 다르게 전개되면 시스템의 지원을 받아 제한된 시간 안에 핵심 정보를 직관적으로 판독하여 특보 업무를 처리하는 것이 차선이다. 하지만 컴퓨터 계산 속도가 빨라지면서 분석자료의 해상도가 향상되고 앙상블 기법이 동원되어 많은 예측 시나리오가 쏟아져 나오고 있다. 그리고 방대한 자료의 데이터베이스에서 양질의 정보

[그림 6] 미국기상청의 정량 강수예보 임계성공지수(GFS: 전지구수치모델 검증지수, NAM: 지역수치모델 검증지수, WPC: 기관 공식 예보의 검증지수)





를 추려내는 데이터 마이닝의 부담은 더욱 가파르게 증가하므로 현장의 업무 여건은 좀처럼 개선되기 어렵다.

문제는 이 같은 기술시스템이 한 번에 완성되는 것이 아니라 기술발전과 함께 계속 고쳐 나가야 하는 과정의 산물이라는 점이다. 미국 기상청에서 사용하는 AWIPS¹⁾라는 예보 판단 지원시스템만 보더라도 지난 수십 년 전부터 지금까지 하나의 대형 소프트웨어에 계속 기능을 추가하고 새로운 기술을 반영하여 버전을 갱신하며 진화를 거듭하고 있다. 어느 나라나 사정은 비슷할 것이다. 다만 이러한 기술시스템 또는 종합 소프트웨어를 독자적으로 발전시켜 가려면 현장의 기술 전문가 층이 튼튼해야 한다. 이론에서 공학적 튜닝에 이르기까지 다양한 스펙트럼선상의 기술 전문가들을 연구 시장에서 예보 현장으로 유인하여 협업할 수 있는 업무 여건 마련이 중요하다.

나. 학습의 관점

영국 왕립기상학회의 일반 잡지 「Weather」에서는 한동안 “back to basics”라는 코너를 개설하여 매월 기상분야의 기초 개념을 한 개씩 골라 다시 음미하고 정돈하는 글을 정기적으로 실었던 적이 있다(예를 들면 Brugge, 1996). 잘 알고 있다고 생각했던 개념이라도 막상 그 글을 읽고 나면 배우는 게 적지 않았다. 각론보다도 마치 “기본으로 돌아가자!”는 구호처럼 들렸던 문구가 새롭다. 영국처럼 기상학이 발전한 나라에서도 기본은 여전히 중요한 것이라는 점을 보여준다.

기상분야 대학 연합이 주도하는 COMET 예보 훈련교재를 보면 특정 예보 주제에 대해 광범위한 문헌을 취합하여 정돈하고, 예보 착안점과 현장 응용 방법을 오랫동안 고심한 흔적이 보인다(Johnson et al. 2015). 예를 들어 중규모 대류계와 직·간접적으로 연결된 극저기압(polar low)의 온라인 교재를 살펴보면 지난 40년간 전 세계적으로 이 분야의 학술적 연구 결과가 요약되어 있다²⁾. 유럽과 북태평양에서 발생하는 극 저기압의 사례 연구가 보여준 예보 시사점도 잘 요약되어 있다. 수치 모델의 모의 특성과 한계, 예보 실무에 참고할만한 선행 인자, 검토 요소도 상세하게 제시하고 있다. 이것은 COMET 사업의 극히 작은 단면을 보인 것으로

1 Advanced Weather Interactive Processing System

2 https://www.meted.ucar.edu/norlat/snow/polarlows/print_whole.htm

중규모 대류계에 관한 다양한 주제의 교재 역시 유사한 완성도를 보인다. 그래서 중규모 대류계에 관한 미래 연구와 개선 방향을 찾기 전에 우리는 지금까지 전 세계 기상 전문가들이 쌓아 올린 이 방면의 방대한 정신적 유산을 충분히 학습하고 예보 현장에서 활용하고 있는 것인지 자문해 보아야 한다.

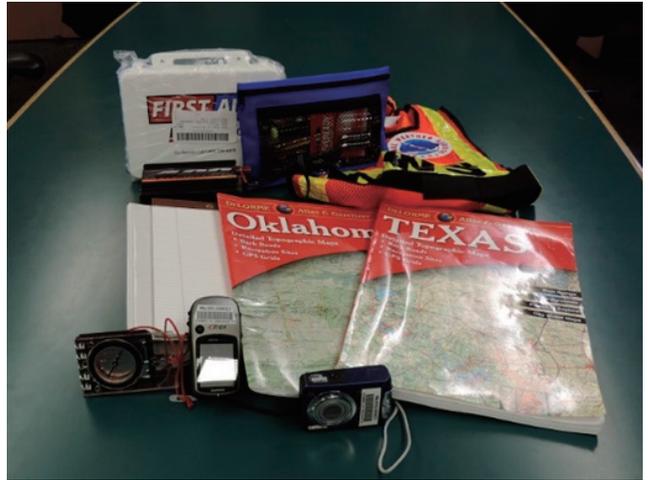
미국 기상청에서는 토네이도가 발생하면 조사팀을 재해 현장에 파견한다. 조사팀은 토네이도의 진행 과정(life cycle)을 재구성하기 위해 자료를 수집한다. 언제 어디서 지상에 내려왔고, 어디까지 이동한 후 다시 상공으로 떠

오른 것인지 살펴본다. 토네이도의 영향 범위와 강도도 분석한다. 중규모 대류계중에서도 선형 강풍대와 회전형 강풍대를 구분하고, 재해와의 연결고리를 찾는다. 최종적으로 피해 가옥이나 나무의 종류 등을 망라한 총 28개의 영향 인자를 분석하여 토네이도의 재해 등급(disaster scale)을 판정한다. 호우나 강풍 특보 업무에서 자연적 현상의 예보와 사회적 피해 예상을 명확하게 구분하기는 어렵다. 예보한 기상현상이 기술적 기준에 도달하면 학문적 성취는 이루겠지만, 사회적 통념의 피해 수준에 도달하지 못하거나 지나치면 과잉 특보나 과소 특보가 되어 수요자의 만족도가 떨어진다. 방재 기관의 재해 데이터베이스를 최대한 활용해야겠지만, 현장에 직접 나가 기상현상과 피해 상황의 연결 고리를 찾고 사후 분석과정에서 재해 시사점을 함께 다룬다면 보다 체계적으로 지나간 특보에서 배우는 것이 많을 것이고, 다음 특보 업무에 더 효과적으로 대비할 수 있게 될 것이다. 또한 현장 조사를 통한 사후 분석 경험은 향후 특보 기준을 개선하는데 실질적인 안내자가 될 것이다.

다. 소통의 관점

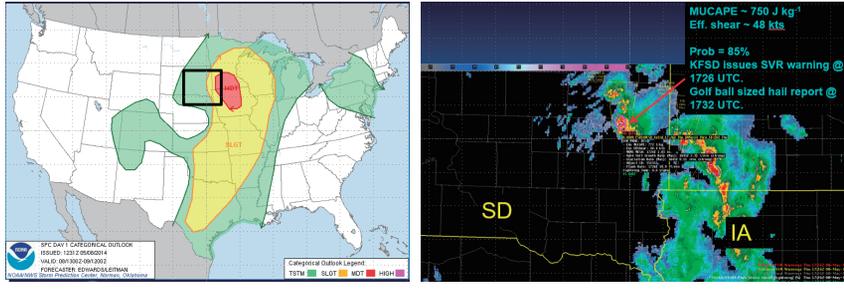
중규모 대류계에 동반한 호우와 강풍은 정해진 시간대가 없다. 야간이나 새벽, 또는 휴일

그림 1 미국기상청 기상 조사팀의 휴대품





[그림 8] 미국기상청 중규모 위험 기상 특보 양식(좌)과 Probsevere 확률적 위험기상 의사결정 지원 도구화면(우) 예시.



우리의 집중력이 가장 느슨한 때를 틈타 엄습하는 것은 자연의 알미운 속성이기도 하다. 밤 9시 TV뉴스 시간을 훌쩍 지나 예고 없이 나타난 레이더 강수에 코의 진행 방향과 속도를 제때 파악하여 예상 피해

규모와 지역을 통보하더라도, 심야에 이것을 특정 지역의 고객에게 전달해줄 메시지가 마땅치 않다. 언론사마다 야간 비상 근무자가 있기는 하지만, 중대한 기상재해가 아니라면 관심을 끌기 어렵다. 또한 돌발 기상 상황은 시시각각 빠르게 변하고, TV나 신문의 갱신 주기는 이 변화를 담기 어렵다. 향후 휴대폰을 근간으로 한 일대일 미디어가 보편화 되기 전까지는 방재 유관기관의 담당자와 기상전문가의 유기적인 소통과 협업이 예나 지금이나 중요한 소통 인프라가 될 것이다.

중규모 대류계에서 국지성은 돌발성의 다른 면이다. 피해 대상 범위가 좁아질수록 전달하려는 메시지는 세부적·구체적이어야 수요자가 만족할 수 있다. 이 지점에서 고객의 요구와 정보의 불확실성이 서로 충돌한다. 고객이 원하는 것을 제공하려면 정보가 상세해야하고, 상세하게 제공하려면 그만큼 예측 실패의 확률이 커지기 때문이다. 일전에 일기예보를 묻는 기자의 질문에 답하기 어려워 한참 동안 여러 가지 가능성을 설명했는데, 마지막에 기자가 다그치며 묻는 것은 결국 그래서 “비가 많이 오는 것이냐”는 단답형 질문에 답을 달라는 것이었다. 정보 공급자와 수요자의 이해를 절충하여 중간 어디선가 양측의 타협점이 필요하다. 미국 기상청에서는 FACET³⁾ 사업을 통해서 기존의 결정론적 특보 방식을 확률론적 방식으로 패러다임을 전환하는 중인데, 특보의 불확실성을 고객과 소통하는 방법을 개선하는데 참고가 될 것이다(Rothfus et al. 2018).

한편 사전 예고 및 특보 조치가 잘 이뤄지더라도 여기저기 기상재해가 발생하면 예보 담당

3 forecasting a continuum of environmental threats

자는 마음이 편치 않을 것이다. 전문가의 입장에서 성공적인 예보라 볼 수 있는 경우라도 피해가 많이 발생해서 사회적으로 원성을 듣게 되면 기상전문가로서는 억울한 측면도 있을 것이다. 기상조건과 상관없이 사회의 어떤 부문에서는 재해에 취약할 수밖에 없는 구조적인 문제가 있다. 기상전문가, 언론종사자, 사회 각층의 수요자가 수시로 만나 서로의 고충을 교환하면 사회의 요구와 기술의 한계, 재해경감에 기여할 수 있는 기상정보의 영역에 대한 공감대의 폭을 넓혀갈 수 있을 것이다.

참고문헌

- Brugge, R., 1996: Atmospheric stability: Part 1 - basic concepts. *Weather*, 51, 134-140.
- Gustafsson N., and coauthors, 2018: Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, DOI:10.1002/qj.3179
- Johnson, V., and coauthors, 2015: Celebrating COMET's 25 years of providing innovative education and training. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2183-2194
- Lee, T.-Y., and Y.-H. Kim, 2007: Heavy precipitation systems over the Korean peninsula and their classification. *J. Korean Meteor. Soc.*, 43, 367-396.
- NRC, 1990: Advancing the understanding and forecasting of mesoscale weather in the United States. National Academy Press, 56pp.
- Rothfus, L. P., and coauthors, 2018: FACETS- a proposed next-generation paradigm for high-impact weather forecasting. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 99, 2025-2043.
- Schaumann, P., and coauthors, 2020: A Calibrated Combination of Probabilistic Precipitation Forecasts to Achieve a Seamless Transition from Nowcasting to Very Short-Range Forecasting. *Wea. Forecasting*, 35, 773-791.
- Surcel, M., I. Zawadzki, and M. K. Yau, 2015: A study on the scale dependence of the predictability of precipitation patterns. *J. Atmos. Sci.*, 72, 216-235.
- 기상청, 2018: 위성자료의 수치예보 활용 확대방안 연구 I.
- 이우진, 2017: 강수량예보, 휴앤스토리, 252pp.
- 이우진, 2019: 기상역학, 휴앤스토리, 339pp.

중규모 대류계의 예측

이동규 서울대학교 명예교수 sohn@snu.ac.kr

- I. 배경
- II. 중규모 대류계
- III. 수치예측모델
- IV. 자료동화 기술
- V. 중규모 대류계와 강수예측 연구사례
- VI. 정책 제언

본 고에서는 집중강수를 유발하는 중규모 대류계를 예측하기 위하여 한반도 지역의 열역학적 배경과 기구/수치예측모델 기술/자료동화기법을 소개하고, 정책을 제언하였다. 주요 제언 사항으로는 중규모 수치예측모델 개선과 기상청의 가용 비종관자료의 활용을 확대하여 한반도에서 발생하는 중규모 대류계와 강수 예측의 정확도를 높이는 연구개발을 추진하고, 예측 불확실성이 큰 현상을 예측하기 위해 앙상블 예측에 기반한 확률예측 확대, 그리고 서울(또는 수도권) 지역에 관측기기 및 시설을 집중하고 적절한 수치모델을 적용한 도시모델 개발연구 과제를 발굴하는 것이다. ■

I. 배경

중규모 대류계(mesoscale convective system)는 온도의 연직변화에 의한 일차적인 에너지로 발생하여 수평온도 및 수분분포에 따른 에너지가 더해지면서 더욱 변화·발달한다. 연직 변화로 발생하는 에너지는 대기 중의 공기가 상승(하강)할 수 있는 양(음)의 부력(대류)을 뜻한다. 연직 조건부 불안정의 대기에 수증기의 공급이 증가하거나 대기가 전선 또는 지형에 의해 기계적인 상승으로 인하여 대기 내의 수증기가 응결하면 대류를 일으키게 하는 자체상승 에너지가 증가한다. 소위 CAPE(Convective Available Potential Energy)라 정의되는 중규모의 대류 잠정 위치에너지는 중규모 대류계 생성, 발달의 기본 개념이다. 중규모 대류계의 운동에너지는 지구 대기 전체 가용 위치에너지의 10% 정도인 종관규모의 운동에너지가 난류에너지로 전환하고 소멸하는 과정에서 단시간 국지적으로 발생하는 대기운동이다. 이 때문에 중규모 대류계의 에너지(대부분 운동에너지)는 대기 중에 지속하는 시간이 종관규모계의 에너지에 비교하여 아주 짧고 빠르며 국지적으로 집중 발생하는 특징을 가진다. 따라서 자연히 종관규모계의 관측과 예측기술로는 잡아내기 어려워 더 조밀한 시공간 규모의 관측과 예측이 필요하다.

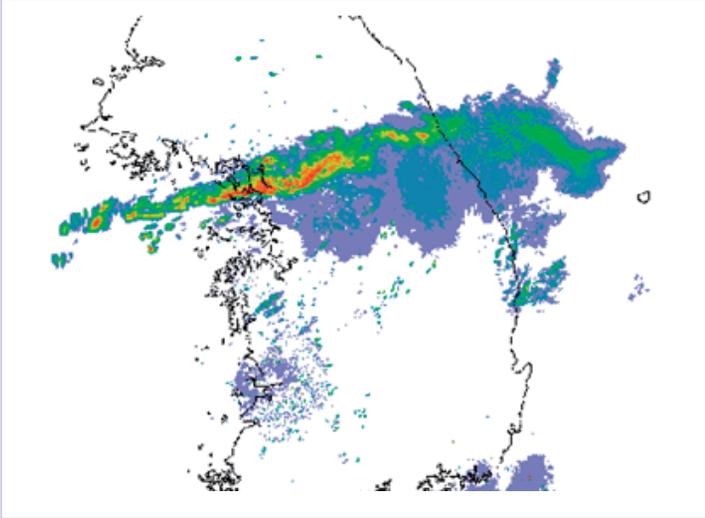
본 고에서는 집중강수를 유발하는 중규모 대류계를 예측하기 위하여 한반도 지역의 열역학적 배경과 기구, 수치예측모델 기술, 자료동화기법을 소개하고 정책을 제언한다.

II. 중규모 대류계

중규모 대류계는 개별적이며 독립적인 뇌우(thunderstorm)보다는 크고 종관규모보다는 작은 뇌우의 조직화된 집단으로서 수명이 2-6시간 정도이다. 위성 또는 레이더 영상에서 원형 또는 선형의 모양을 가지며 발달 중 형태가 바뀌는 적운구름 밴드 또는 클러스터, 스콜선, 중규모 대류복합체(mesoscale convective complex), 열대저기압 등이 여기에 속한다. 중규모 대류복합체는 중규모 알파 공간규모이고 6시간 이상 지속하는 다수의 뇌우세포 집단으로 대류계가 아주 깊고 상단의 온도도 아주 낮다. 중규모 뇌우 집단은 수평공간규모 2-20km(1시



[그림 1] 1998년 8월 5일 1630UTC 레이더 반사도(8월 4-5일 강화 지역의 일강수량 619mm, 시간당 112mm(1600-1700UTC) 호우 사례 중)



간정도)의 감마 대류계, 20-200km(2~6시간)의 베타 대류계, 200-2000km(6시간 이상)의 알파 대류계로 주로 분류된다. 중규모 대류계가 활동하는 동안 동반하는 호우는 짧은 시간에 좁은 지역에 집중강수를 내린다. 호우는 보통 시간당 30mm 이상이나 하루 100mm 이상의 강수가 있을 때 또는 연강수량의 10%에 상당하는 일강수를 내리는 정도의 비를 일컫는다. 많은 강수량이 동반되는 이유는 종관 상태, 지형, 발생시간 등 주변 환경에 따라 중규모 대류계가 한 지역에 정체하면서 지속 성장-

발달-쇠퇴 하는 특성이 있고, 또 중규모 대류계가 이동하면서 여러 지역에 많은 비를 내리기 때문이다. 1998년 8월 4-5일 발생한 밴드형 중규모 대류계로서 경기도 강화에 시간당 최고 강수량 112mm, 일 강수량 619mm를 내린 사례의 밴드 대류계 레이더 반사도(1630UTC)를 [그림 1]에 나타냈다.

한반도 지역의 중규모 대류계 발생, 발달 기구에 대한 열역학적 특성은 종관규모 운동계의 기상배경이 구조화하는 경우가 많다. 중국대륙의 중상층 북서저기압 골, 상층 제트기류, 북서태평양고기압, 하층 제트기류의 위치와 강도는 중규모 대류계 발생과 발달에 있어서 중요한 종관규모 기상 배경이다. 중상층 북서저기압 골과 북서태평양고기압은 중규모 대류계가 발생할 배경 경압성을 구축한다. 상층 제트기류는 북서 한랭기류의 유입을 가져올 뿐만 아니라 종관규모의 연직 2차순환 환경을 조성하고 하층 제트기류는 북서태평양고기압 서쪽 연변을 따라 고온다습한 남쪽 공기를 북 또는 북동으로 수송하는 벨트 역할을 하여 중규모 대류계 및 강수 강도에 직접적인 영향을 준다. 중규모 대류계를 발생시키는 중요한 방아쇠 기구의 하나는 한반도 육상 또는 주변 남서 해양에서 하층기류의 수렴지역이 형성되어 연직 불안정도와 수평 열에너지의 공급이 증가하여 중규모 대류계의 생성·발달에 기여하는 경우이다. 대기

중수증기 양 증가와 대기의 기계적 상승은 CAPE를 증가하게 하고 특히 수증기 양은 수평에 너지 공급원으로서 대류계가 자체 발달하는 주요인자이기도 하다. 단세포 뇌우 속의 수증기가 상승하면서 응결하여 상승기류의 부력을 가속시키고, 뇌우 내의 상승기류에 대한 보상이 강기류가 상승기류 상승과 수증기 냉각을 도와 자체로 지속하는 대류계가 구조화되고 수증기의 공급이 감소하면 쇠퇴한다. 중규모 대류계는 종관기상 배경이 지속되고 열과 수증기 공급이 증가하면서 뇌우 진행의 전후방에서 새로운 뇌우가 발생하거나 자체 급성장하면서 집단적 뇌우로 발달한다. Lee 등(2008)은 1998년 7월 31일부터 8월 17일까지 한반도에서 계속 발생한 일련의 집중호우 사례들의 종관기상과 강수 패턴을 연구한 바 있다.

국지적으로 단시간에 많은 강수를 내려 인명손실과 재산피해를 일으키는 중규모 대류계와 동반되는 강수의 예측성을 높이려는 연구와 현업예보는 기상학적 측면뿐 만 아니라 사회경제 측면에서 아무리 강조해도 부족하지 않다. 지난 반세기 동안 국내외에서 중규모 대류계와 관련 강수계의 기구를 이해하고 예측을 높이는데 괄목할 수준에 이르렀지만, 중규모 대류계의 특성 및 관측자료와 예측모델의 한계로 인하여 중규모 대류계의 발달지점과 시간, 강수량과 강도, 발생 선행시간 등을 예측하는데 여전히 한계가 있다. 우리나라의 지상, 고층, 위성, 레이더, 연직 바람프로파일 등 비 종관 관측측기 및 시설은 대체로 중규모계를 관측할 수 있는 좋은 관측 네트워크이라 할 수 있다. 그러나 한반도의 삼면이 해상으로 둘러있고 북한지역의 중규모적 자료공백으로 인한 시공간 관측자료의 불연속이 존재할 뿐만 아니라 복잡한 해상 및 지형조건으로 인한 중규모 대류계의 발생·발달을 이해 및 예측하는 데에도 또 다른 한계가 있다. 또 여름철 북서태평양고기압의 위치변화, 북서태평양고기압서북 연변을 따라 이동하는 열과 수분 수송, 중국북쪽 중상층 북서저기압 골의 이동과 동반되는 저온 핵의 남하위치 및 강도 같은 종관규모계의 예측정확도 수준도 어려움을 더한다.

중규모 대류계 예측은 주로 두 가지 방법으로 도전한다. 현재의 관측망에서 대류계의 발생 징후가 포착되어 예측할 수 있는 경우와 현재의 관측망에서 발생 징후를 포착하지 못하지만 (실제로 징후가 있을 수도) 종관규모 예측자료에서 발달 징후가 있어서 예측할 수 있는 경우이다. 전자의 경우는 현존하는 관측망의 관측자료에서 읽어내도록 중규모 대류계의 발생, 발달 기구를 충분히 이해하는 기술 또는 종관규모 예측자료에서 징후를 알아낼 수 있는 기술이



고, 후자의 경우는 중규모 대류계의 발생- 발달- 쇠퇴를 해석하는 도구, 즉, 중규모 관측자료와 중규모 수치예측모델을 이용하는 기술이다. 전자의 경우도 관측망에 잡히는 초기자료를 잘 사용하여 수치모델에서 중규모 대류계를 예측하도록 도움을 받을 수 있다. 어느 경우에도 중규모 수치모델에 입력할 중규모 초기자료의 자료동화기법을 개발하고 중규모 대류계 및 관련된 강수과정을 잘 모의 할 수 있도록 중규모 수치예측모델 시스템을 구성하는 것이 중요하다.

세계는 저고기압계의 종관규모 현상을 예측하기 위해 중기예측모델을 개발하고 지속 투자로 종관규모계 관측망을 구성하여 종관규모 기상의 3-5일 예측성을 높이고 10일까지 예측성을 연장해 왔음을 상기할 필요가 있다. 그러므로 중규모 현상의 운동에너지가 단시간의 국지적 집중현상으로 나타나기 때문에 종관규모 관측자료 및 수치예측모델 자료에서 중규모 대류계의 징후를 포착하는 기술 및 중규모 관측망의 구성과 고해상도 수치예측모델 기술에 의해 예측성을 향상시킬 여지는 충분하다. 지난 반세기 동안의 기술발달을 보아왔듯이 향후 관측기술의 발전으로 중규모 관측과 관측망이 지속 발전할 것이 기대된다. 개인과 국가의 사회경제적 피해를 줄이기 위해 모든 국가가 중규모 수치모델과 강수과정 시스템의 개발, 중규모 자료동화 기법의 향상, 예측자료와 도구의 신속한 활용 및 적용 기술을 강조해야 한다. 세계기상기구(WMO)의 세계날씨연구프로그램(World Weather Research Program, WWRP)은 2010년 중반 THORPEX사업(지구적 종관규모계의 관측, 이해, 예측 연구개발)의 후속사업으로 기상재해에 대해 수분에서 수개월 그리고 수km에서 수천km의 이음새 없는 예측(Seamless Prediction)이 목표인 지구시스템모델 개발이 필요하다는 것을 제안하였다. 이를 위해 HIWeather (High Impact Weather) Project, S2S (Sub-seasonal to Seasonal) Project, Polar Prediction Project 3개 사업을 계획하고 진행 중이다. 여기서 주목할 것은 재해기상이 작은 규모의 현상만으로 발생하는 것이 아니라(여기서 가뭄은 제외함) 모든 현상의 규모와 연관되므로 기상학적, 국가적, 사회적 측면에서 재해에 신속한 대응이 필요하다는 것을 강조 한다. WWRP는 모든 국가와 사회가 현재까지 개발한 예측기술 및 관측자료를 더욱 효율적으로 활용하여 신속하게 재해에 대응하는 서비스기술을 강조하여 재해대응 시스템개발을 촉구한다. 연구개발도 강조되어야 하지만 재해에 신속히 대응하는 서비스기술의 개발 (Research to Service)을 통해 재해대응시스템의 변화가 필요하다는 것이다(WMO, 2017).

III. 수치예측모델

중규모 대류계를 예측하기 위해 사용하는 중규모 수치모델은 관측자료와 함께 다양한 중규모 현상을 규명하고 이해하는데 중요한 도구이다. 대표적인 중규모 수치예측모델로서는 미국 국립환경예측센터와 국립대기과학센터가 공동 개발한 종합적 날씨연구예보(Weather Research and forecasting, WRF)모델을 들 수 있다. 이 모델은 연구와 예보의 목적을 동시에 달성하는 차세대 중규모 수치예측모델시스템으로써 역학코어, 물리시스템, 자료동화시스템, 소프트웨어 아키텍처로 구성된다. 현재 전산기술이 급속히 발전되어 엑사(Exa)급 슈퍼계산능력과 시공간이 정교한 고해상도 수치예측모델이 가능하므로 중규모 수치예측모델의 활용이 상당히 기대된다. 최근 고해상도 중규모 수치예측모델을 전구모델 내에서 적분할 수 있도록 설계한 변동 격자(Variable Grid) 수치모델을 구상하여 두 모델 사이의 물리역학 상호작용 그리고 중규모계를 위한 별도의 자료동화 등 도전적 연구도 진행되고 있다. 기상재해의 이음새 없는 예측을 위해 전구에서 국지까지 해석하는 수치예측모델시스템의 구축도 진행되고 있다.

강한 중규모 대류계의 연직속도가 종관규모 연직속도의 100배 정도까지 발달하고 연직운동이 대류권계면 위로 올라가므로 강한 연직속도를 고려하는 비정역학방정식계가 적절하다. 그렇게 되면 1-2km 수준의 수평격자, 100층 정도 연직해상도의 중규모 대류계 수치예측모델에서 다양하고 많은 관측자료를 사용할 수 있다. 그리고 상세 모델 물리과정을 적용하여 강수량 예측성을 높일 수 있다. 중규모 수치모델의 특징은 강수관련 정교한 물리과정의 모수화 방안들인 행성경계층방안, 깊은 대류방안, 수분미세물리방안이 열역학 방정식계와 결합되어 비교적 실제적인 강수량을 모의하는데 기여한다는 점이다. 최근 수분미세물리방안은 물의 6개 상태까지 해석하는 방정식계를 도입하여 모델의 강수과정에서 물의 상태를 좀 더 정교하고 다양하게 해석한다. 깊은 대류방안의 경우 모델의 수평격자 크기에 구애되지 않는(Scale Aware) 종관규모계 뿐만 아니라 중규모계까지 넓게 적용되는 방안이 나오고 있다. 또 구름, 에어러졸, 복사의 미규모적 상호작용을 함께 동시해석하고 구름 물리계와 그 이상의 운동규모계 사이에서 발생하는 상호작용을 허락하여 모델의 안정도를 높인다.

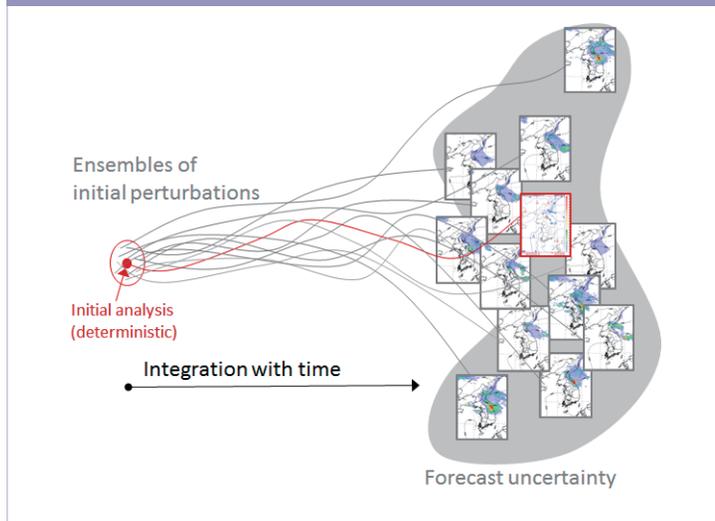


초기치 문제인 날씨예측에서 수치예측모델의 초기조건은 예측정확도를 크게 좌우한다. 중 규모 대류계를 해석할 수 있도록 중규모 관측자료를 늘리고 중규모 수치모델 내의 역학물리 계 방안들을 개선개발해야하는 획기적인 계획이 필요하다. 미국 기상청, 연구기관, 대학이 공동으로 1980년대 재해기상의 예측성을 높이기 위해 범국가적으로 관측과 예측 프로젝트를 10년 동안 진행하여 중규모계의 규명과 이해 그리고 중규모 수치예측모델의 개발에 크게 기여하였다. 한국도 집중강수 예측성을 높이기 위해 연구소와 대학이 공동으로 가용 관측망을 동원하고 특별관측을 통한 중규모 대류계의 이해와 수치예측모델을 시험하고 물리과정을 개선하는 사업을 수행하였지만 지속하지는 못했다.

수치모델의 한계성과 모델 초기자료의 오차로 인하여 수치모델의 기상예측은 항상 불확실성이 존재한다. 이 오차를 줄이기 위한 방안으로 앙상블 예측방법이 활용된다. 앙상블 예측은 앙상블 멤버의 구성 방법과 멤버의 수를 결정하게 되므로 가용 계산자원을 고려해야 한다. 초기자료의 오차를 줄이기 위해 시간대가 다른 초기자료를 사용하는 시간지연 앙상블 방법과 초기자료에서 특이벡터를 찾아 구성하는 특이벡터 방법을 주로 사용한다. 또 수치예측모델 내의 예측에 민감한 물리과정 파라미터들을 조합하여 앙상블 멤버를 구성하는 방법도 있다. 앙상블 예측은 앙상블 평균과 스프레드를 가지면 확률예측이, 특히 강수 확

률예측이 가능하다. 앙상블 예측은 비선형성이 큰 중규모 대류계와 관련된 강수 예측에 적용하기에 어려움이 크지만 중규모 대류계의 비선형적 초기 성장이 빠르게 진행하고 계산파워 문제로 아직 활용성이 크지 않은 실정이다. 기상청의 현업 모델 LDAPS(Local Data Assimilation and Prediction System)의 앙상블 예측 사례를 소개한다[그림 2].

[그림 2] LDAPS의 강수 앙상블 예측 사례. 12개 멤버와 1개의 결정 예보(붉은 색)



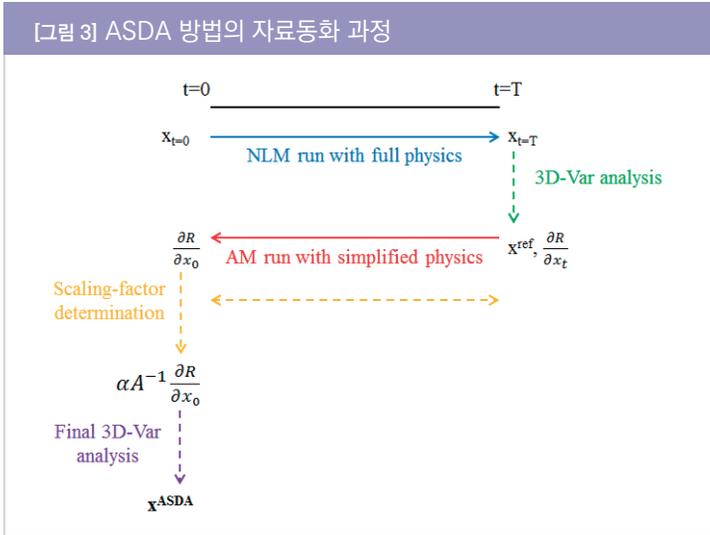
IV. 자료동화 기술

관측자료에 포함되어 있는 고주파, 잡음, 그리고 관측오차를 수치예측모델에 초기자료로 그대로 입력하면 모델이 적분되는 동안 빠른 속도로 오차가 증가하면서 기상현상의 생성·발달을 저해한다. 또 관측자료는 분석과정을 통해 수치모델에서 해석하려는 기상현상 규모에 적합하도록 수치모델과 균형을 이루는 과정이 필요하다. 이를 모델입력의 자료분석 및 초기화라 하고 자료동화과정이라 총칭하기도 한다. 변분자료동화 방법이 전구수치모델의 종관규모 운동계에 널리 적용되면서 중규모 수치예측모델에서도 활용되는 추세이다. 수학적 변분분석 방법은 편미분 방정식의 해를 구하여 오차를 최적화하는 원리인데 이 원리를 실제적인 수치모델에 적용하여 편미분 방정식의 해를 구하려면 거의 불가능하다. 미국 국가환경예측센터(NCEP)는 수치모델의 과거 종관규모 예측성과 분석장으로부터 배경장을 구하고 예측에 이용할 관측자료와 배경장 사이가 최적화하는 과정으로 실용적인 방법을 도입하였다. 배경장을 구하는 방법도 여러 가지가 있지만 변분자료동화 방법은 3차원 공간에서 최적화하는 3차원 변분자료동화, 시간을 포함하는 4차원 변분자료동화가 있다. 4차원 변분자료동화는 관측자료의 종류와 수가 많으면 계산량이 상당히 증가하여 대용량의 전산자원이 필요하다. 변분자료동화에서 종관규모 운동계의 배경장은 잘 구조화되는데 반해, 중규모 운동계를 포함하는 배경장의 구성, 특히 비선형성이 크고 급속히 발달하는 중규모 운동계에 적용하기에 큰 한계가 있다. 그래서 수치예측모델과 초기자료를 외부함수로 강제하여 모델이 적분하는 동안 점진적으로 동화하는 비교적 간단한 방법이 있지만 초기자료의 오차를 제거하고 모델초기 입력자료와 수치예측모델 사이의 균형을 이루는 데는 충분하지 못한 방법이다.

Choi 등(2014)과 Choi 등(2015)은 중규모 대류계를 예측하는데 있어서 4차원 변분자료동화의 단점인 계산량을 극복하고 최적화하는 방안으로써 수반 민감도(Ajoint Sensitivity) 기반 자료동화 방법을 제시하고, 한반도에서 발생하는 집중호우 대류계에 적용하였다. 수반민감도 기반 자료동화 방법은 자료 동화창을 4차원 변분자료동화와 같은 구간을 사용하지만 4차원 변분자료동화에 비해 계산량을 대폭 줄일 수 있다. ASDA 방법은 먼저 예보오차를 입력하여 수반모델을 후진적분하고, 이렇게 얻은 초기조건에 대한 예측오차의 수반 민감도를 최적 스케일 인자(Optimal scale factor)를 사용하여 규모화 한다. 그리고 규모화 된 수반 민



[그림 3] ASDA 방법의 자료동화 과정



감도를 원 초기추정 값에 추가한다. 최적 스케일 인자는 4차원 변분자료동화 방법의 자료 동화창 내에 있는 모든 자료를 사용하며 관측 비용함수를 최소화하여 결정한다. 개선된 초기 추정 값을 사용하여 분석 시간대의 관측자료를 3차원 변분자료동화 방법으로 동화한다. ASDA 방법은 예측오차의 수반 민감도를 사용하여 배경장이 아닌 초기추정 값이 수정되는 점을 유의할 필요가 있다. 이 모든 과정의 계산비용은 4차원 변분자료동화와 동일한 자료

동화창을 사용하면서도 4차원 변분자료동화 방법보다 훨씬 적다. ASDA방법을 도식도로 설명하였다[그림 3].

V. 중규모 대류계와 강수예측 연구사례

Choi 등(2015)는 한반도에서 발생한 집중호우 10개 사례를 선정하여 중규모 대류계와 관련된 강수량 예측을 위해 레이더자료(반사도와 시선속도)의 자료동화를 실험하였다. 10개 집중호우 사례는 Lee와 Kim(2007)이 집중호우 사례를 분류한 방법에 따라 단일 뇌우(Isolated Thunderstorm, IS) 2개 사례, 대류 밴드(Convection Band, CB) 2개 사례, 구름 클러스터(Cloud Cluster, CC) 2개 사례, 스콜선(Squall Line, SL) 3개 사례, 그리고 태풍의 대류강수 1개 사례로서 레이더자료를 사용할 수 있는 경우이다. 자료동화 실험 방법으로 자료동화를 하지 않은 실험, 3차원 변분자료동화 실험, 4차원 변분자료동화 실험, 수반민감도 기반 자료동화 실험을 적용하였다. 수평해상도 54, 18, 6km의 다중모델 영역을 가진 WRF 수치예측모델에서 실험을 수행하였다. 주요 모델 물리과정으로 Kain-Fritsch 적운모수화 방안, WSM6 미세물리 방안, YSU 대기경계층 방안, Noah 지면 방안을 사용하였으며, 배경오차공

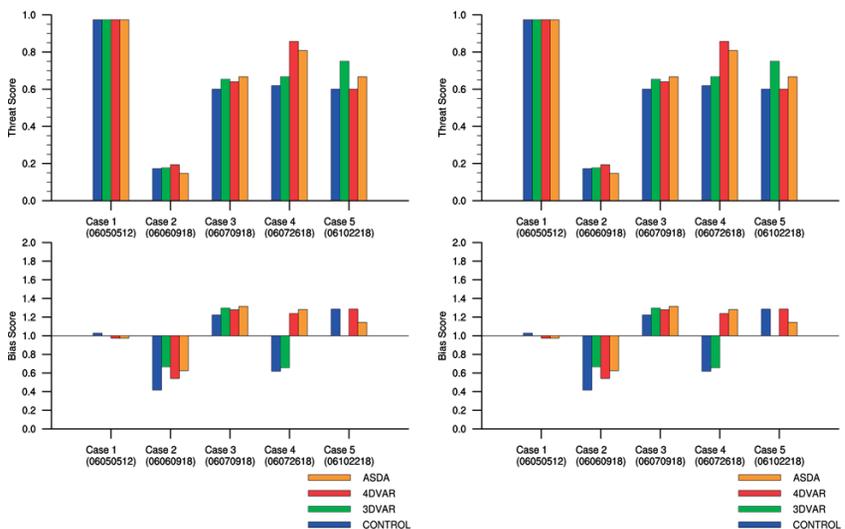
〈표 1〉 시장기반조치 유형별 장단점 비교

| | Number of iterations | Computing time per an iteration | Total computing time |
|-------|----------------------|--|----------------------|
| 3DVAR | 16 | <1minute | ~3minutes |
| 4DVAR | 54 | ~30minute | ~27hours |
| ASDA | 18(final 3D-VAR) | Two 3D-VAR analyses, one NLM run, one AM run, and scaling-factor | ~1hour |

분산은 NMC 방법으로 구하고 10분 간격 레이더자료를 6km 모델영역에서 30분 자료 동화창에서 자료동화를 하였다. 상세한 실험 설계는 Choi 등(2015)을 참조하기 바란다.

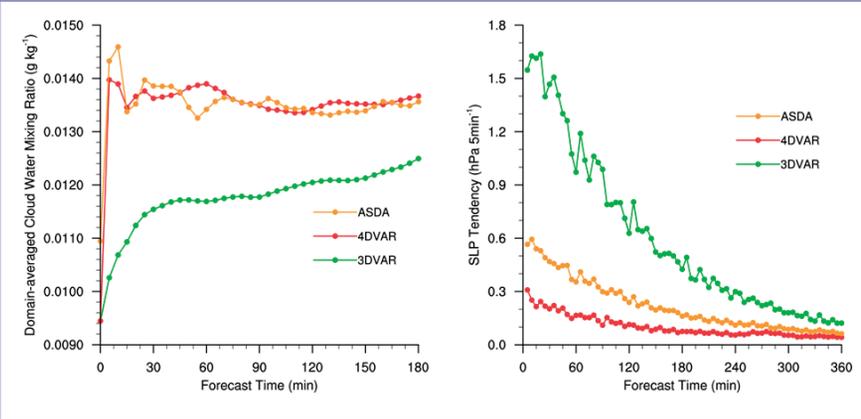
이 실험 결과에서 자료동화를 포함한 총 계산량 차이는 수반민감도 기반 자료동화 실험이 4차원 변분자료동화 실험보다 27배 정도 적었다(그림 4). 강수량 예측을 평가하는 Threat Score(TS)에서 대략 3개 사례 정도가 자료동화를 하여 얻은 결과가 좋았고 그 외 모든 실험 결과에서 큰 차이가 없었다. 4차원 변분자료동화와 수반민감도 기반 자료동화 사이의 강수량 TS는 서로 비슷하였다(그림 4). 그러나 기상장의 내용을 보면, 모델영역 평균 구름물 혼합비와 해면기압 변화 경향은 10개의 모든 사례를 평균한 결과가 4차원 변분자료동화 방법과 수반민감도 기반 자료동화 방법이 좋게 나타났다(그림 5). 4차원 변분자료동화와 수반민감도 기반 자료동화의 구름물 혼합비가 초기시간에 충분히 스피업(Spin Up) 되어 강수과정의 초기화에 기여하였다. 모델영역 평균 해면기압 변화 경향은 모델 적분의 안정도 척도를 나타내므로 수치모델의 수반민감도 기

〈그림 4〉 10개 집중호우 사례의 강수량 Threat Score와 Bias Score





[그림 5] 모델영역의 예측 구름물 혼합비와 해면기압 변화율



반 자료동화가 3차원 변분 자료동화보다는 4차원 변분자료동화에 아주 접근하였다. 이 집중호우 사례들의 레이더 관측 반사도와 시선속도를 시간에 대한 상관관계를 분석한 결과에 따르면, 단일 뇌우와 스텝셀 사례는 30분 보다 작은 자료 동화창을, 대류밴

드와 구름 클러스터는 30분보다 큰 자료 동화창을 사용하는 것이 바람직하다는 것을 보였다.

중규모 대류계를 이해하고 예측하는데 비종관 관측자료, 특히 레이더자료, 활용이 중요하다. 여러 종류의 비종관 관측자료(지상, 위성, 레이더, RO 수분, 연직바람 프로파일러 등)를 중규모 모델에 활용하려면 자료동화 과정이 필요하고, 관측 자료의 종류와 수 그리고 자료 동화 창 및 동화에 필요한 계산 등을 고려하면 수반민감도 기반 자료동화 방법은 매우 실용적이다. 자료동화 효과가 있고 계산시간이 적으면 앙상블 예측의 앙상블 멤버를 증가시킬 수 있는 장점을 가지므로 급속히 발달하는 비선형 중규모 대류계의 예측에 적용할 수 있다. 여기에 제시한 수반민감도 기반 자료동화 방법은 최적인자의 결정과정 등의 개선 연구와 관측자료의 종류에 따라 최적화 하는 방법을 개발할 필요가 있다.

VI. 정책 제언

가. 중규모 대류계의 예측 향상

중규모 수치예측모델 개선과 기상청의 가용 비종관자료의 활용을 확대하여 한반도에서 발생하는 중규모 대류계와 강수예측의 정확도를 높이는 연구개발을 제안한다. 최근 향상된 기

상청 레이더자료와 앞서 소개한 연구결과에서 보았듯이 획기적으로 계산량을 개선한 수반 민감도 기반 자료동화(ASDA)방법을 현업예보에 적용할 목표를 세워 비종관자료의 모델 초기자료 입력기술을 개발한다. 현 레이더자료는 시공간 해상도가 증가하고 자료품질이 개선되었으므로 중규모 대류계의 생성-발달을 해석하는데 기여할 것이다. 우선 최적 스케일 인자를 포함한 ASDA방법의 개선 실험과 계산자원을 감안한 레이더자료동화의 효과를 극대화하는 선행연구가 필요하다. 한반도의 복잡한 지형에서 하층 레이더자료가 결핍되고 지상과의 불연속성이 존재하기 때문에 레이더자료와 지상자료 사이의 기상학적 연직관계를 구축할 수 있도록 자료동화기술의 활용이 중요하다. 중규모 대류계의 방아쇠 기구는 대기 하층에 존재하므로 복잡한 지형에서 지상자료와 레이더자료 사이의 관계를 자료동화로 해결할 수 있으므로 예측성을 높일 수 있다. 즉, 레이더자료와 지상자료를 함께 동화하면 중규모 대류계의 하층을 구조화하는 시너지효과를 기대할 수 있다. 이를 통해 개선된 결과를 기반으로 위성, RO 온도 및 수분자료 등 비종관자료의 활용 및 확대 연구개발로 이어져야 한다.

중규모 수치예보모델은 강수과정 방안들의 미세물리과정을 포함하여 복잡한 과정으로 구성된 물리모수화 방안들로 구성되어 있다. 따라서 중규모 대류계와 관련된 강수의 예측성을 향상시킬 물리과정을 최적화하는 개선연구는 지속되어야 한다. 한반도 지역의 중규모 특별관측 자료와 현재의 관측 네트워크 자료를 통해 물리방안들을 조정하고 AI(Artificial Intelligence)기술을 이용하여 물리과정을 최적화하면 수치예보모델의 운영 효율성과 강수 예측성을 향상할 수 있다. 한반도에서 발생하는 중규모 대류계의 발달은 특히, 대기의 열과 수분 변화가 종관기상 배경에 크게 영향을 받기 때문에 과거 집중호우를 일으킨 중규모 대류계 사례들에 AI기술을 적용하면 수치예측모델의 공간 해상도 해석, 물리과정 내의 파라미터 조정, 모델에 적용할 비종관자료의 선택과 동화, 호우발생 시간과 지점의 포착 등을 개선할 수치예측모델 시스템을 구성할 수 있다.

나. 고해상도 앙상블 예측성 개발

비선형 중규모 대류계의 예측은 불확실성이 높다. 예측 불확실성이 큰 현상을 예측하는 데는 앙상블 예측에 기반하는 확률예측이 하나의 대안이 될 수 있다. 급속히 발달하는 중규모



대류계에 앙상블 예측을 적용하려면 모델 수행시간 최소화, 계산자원 마련, 앙상블 구성 멤버 결정 방법이 선행되어야 한다. 비선형 중규모 대류계를 예측할 때 초기 입력자료에서 역학적 관계성(특이벡터 등)의 앙상블 멤버를 구성하는 방법은 쉽지 않다. 종관기상 배경의 역할이 크고 비선형성이 작은 중규모 대류계의 사례에서 특이벡터로 앙상블 멤버를 구성한 연구도 있지만 일반화하기 쉽지 않아 앙상블 멤버의 구성에 아직 적절하지 않다. 모델 초기입력자료의 시간지연 관계를 이용하거나 다양한 비종관 자료의 선별적 자료동화과정으로 멤버를 구성하는 방법도 찾을 수 있을 것이다. 물리과정 세트가 다른 수치예측모델의 모델들을 멤버로 구성하여 다중 수치예측모델로 앙상블 예측하거나 한 수치예측모델의 물리모수화 방안 속에 내재하는 많은 파라미터들의 조합을 앙상블 멤버로 구성하는 방법을 개발할 수 있다. 이러한 방법들도 과거의 중규모 대류계 사례들에 AI기술을 적용하여 수치예측모델을 훈련시키면 더 효과적인 앙상블 멤버를 구성할 수 있다. 이론적으로 앙상블 예측으로부터 확률예측을 사용하면 중규모 대류계와 관련된 강수의 불확실성을 크게 줄일 수 있다. 또 전산기술의 발달로 계산능력이 증가하면 앙상블 멤버를 증가시킬 수 있어서 확률예측의 정확도를 더욱 높일 수 있는 길이 열린다.

다. 가속되는 도시화에 대비한 Urban Model(도시모델)의 개발

세계인구가 도시에 집중한다. 도시와 관련된 크고 작은 기상재해현상은 시급한 이슈이다. 기상기후의 도시모델이 필요한 이유이다. 도시모델은 중규모계-감마(수평규모 2-20km)의 수치모델을 기반으로 수평규모를 수-수백m로 상세화한 모델이다. 구체화하면, 종관규모 그리고 중규모 순환계 배경 하에 지표근처의 생물(생태)계, 복사계, 대기물질(에어로졸, 가스 등)계, 도시특성 등을 접합하여 도시에서 발생하는 대기 상태 및 운동 그리고 인간활동과 사이의 상호작용을 포함하는 고해상도 상세 수치모델이라 할 수 있다. 인간의 활동이 도시에 집중되고 도시가 복잡성을 가지면서 도시의 열섬효과라는 기상용어가 고루하다는 수준으로 현재의 도시는 홍수, 강풍, 폭염, 미세먼지 등 도시적 극한 기상현상이 증가하고 있다. 그러므로 도시모델은 복잡할 수밖에 없다. 중규모 모델을 기반으로 개발하더라도 지표근처의 물리, 화학, 생물학적, 인공적 과정들이 접합되어야 하고 관련된 기상 및 기후자료들의 분석과 제공

이 필요하다. 연구개발을 위하여 관련 전문가들의 참여, 기술개발 로드맵, 관측기기 장비 및 시설의 구성이 먼저 필요하다. 이미 많은 국가에서 도시모델 개발연구가 활발하고, 일부에선 현업운영 단계에 와 있다. 관측프로그램의 한 예로서 TOMACS(Tokyo Metropolitan Area Convection Study for extreme weather resilient cities)는 대도시에서 발생하는 강한 재해성 날씨(High impact weather) 특히, 도시의 호우를 이해예측하기 위해 2013년부터 5년간 수행한 국제적 관측연구 사업이다(Seino 등, 2018). 서울(또는 수도권) 지역에 관측기기 및 시설을 집중하고 적절한 수치모델을 선정하여 도시모델을 개발하는 연구과제를 제안한다.

참고문헌

- Choi, Y., G.-H. Lim, and D.-K. Lee, 2015: Applicability of the adjoint sensitivity-based data assimilation method: Radar data assimilation for heavy rainfall cases over the Korean Peninsula. SOLA, 11, 53-58, doi:10.2151/sola.2015-012.
- Choi, Y., G.-H. Lim, D.-K. Lee, and X.-Y. Huang, 2014: An adjoint sensitivity-based data assimilation method and its comparison with existing variational methods. Tellus, 66, 21584.
- Lee, D.-K., J.-G. Park and J.-W. Kim, 2008: Heavy rainfall events lasting 18 days from July 31 to August 17, 1998 over Korea. J. Meteor. Soc. of Japan, 86, 2, 313-333.
- Lee, T.-Y., and Y.-H. Kim, 2007: Heavy precipitation systems over the Korean Peninsula and their classification. J. Korean Meteor. Soc., 43, 367-396.
- Seino, N., R. Oda, H. Sugawara, et al., 2018: Observation and simulation of the mesoscale environment in TOMACS urban heavy rain events, J. Meteor. Soc. of Japan, 96A, 221-245.
- WMO, 2017: WWRP Implementation Plan 2016-2023, 49p.

위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단

손병주 서울대학교 교수 sohn@snu.ac.kr

I. 서론

II. 한국과 미국 대평원 강우 특성 비교

III. 한반도에서 나타나는 강수유형: 온난형 vs. 한랭형

IV. 온난형 강우에서 총돌-병합과정의 역할

V. 요약 및 제언

1998-2014년 하계기간 동안 한반도에서 적외(IR)관측치로부터 얻은 다양한 강우량 자료를 강우계 관측자료와 비교하여 위성관측을 이용한 한반도 구름 및 강우시스템을 조명하고, 특징을 분석하였다. 그 결과 한반도 강우가 크게 해양성 온난형과 대륙성 한랭형 강우가 혼재된 형태로 존재하는 것으로 나타났다. 각 강우 형태의 구름물리적 특성은 매우 다르다. 혼재한 두 강우유형의 발생 환경, 구름특성, 지속시간의 상이함은 한반도에서 강우 예측성능 향상을 위한 적절한 방법을 제시하고 있다. 한랭형의 경우 서해상에서의 대기관측자료 확보와 이를 활용한 자료동화가 예측에 많은 도움이 될 수 있고, 온난형의 경우엔 수증기가 다량 포함된 대기, 대규모 종관장에 의한 수증기 수렴 특성을 통해 예측성을 향상시킬 수 있을 것이다. ■

1. 서론

한반도에서의 강수량은 홍수와 한발 등 경년변동성이 크다. 그 중 하계 강우는 중규모 대기운동과 관련 중규모 대류현상, 장마전선 관련 강우, 태풍 북상 및 통과와 큰 연관이 있는 것으로 알려지고 있다. 대류계와 관련하여 나타나는 호우는 막대한 인명 및 재산피해를 유발하는 대표적인 자연재해이다. 강우의 변동성과 밀접히 나타나는 한발이나 폭염 역시 국민의 일상생활에 막대한 영향을 주는 기상현상이다. 따라서 한반도에서의 강우계 특히 중규모 대류계에서 발달하는 강우시스템에 대한 구름내부 물리과정의 이해, 레이더 및 인공위성 활용 원격감시 등은 호우로 인한 자연재해의 저감을 위해 매우 중요하며, 이를 통해 강수예측 능력 향상을 기대할 수 있을 것이다. 특히 구름물리과정에 대한 이해는 인공위성을 이용한 강우관측이나 레이더 알고리즘의 성능향상, 수치모델을 이용한 모델개선 및 강수예측에서 매우 중요한 분야로 간주되고 있다. 구름 물리과정은 육지나 해양, 산악 등 지역 및 지형에 따라 다르다. 그래서 한반도 부근의 국지호우나 중규모대류계와 연관된 강우 발달의 보다 나은 이해를 위해서는 관심지역(한반도 및 주변지역)에서 얻어진 구름물리변수의 관측자료 확보가 필수적이다. 그러나 스톱의 발달과정을 기술할 수 있는 다양한 구름물리, 열역학 및 역학자료의 관측실험을 통한 획득과 분석, 후속으로 이어지는 모델링 및 예측에의 활용은 그 예가 드물다. 이러한 측면에서 인공위성관측에 의한 강우과정 및 미세물리과정의 이해가 모델링을 통해 예측모델 개선으로 이어지면 강수예보 정확도 개선이라는 긍정적인 효과를 기대할 수 있을 것이다.

일반적으로 호우는 강한 상승기류와 함께 높은 고도까지 성장하는 키가 큰 대류운으로부터 발생하는 것으로 알려지고 있다. 구름 및 강수의 발달과 함께 뇌우나 우박의 발생도 일반적인 대기과학입문서에서는 호우를 유발하는 대류 및 구름발달, 강수에 대한 설명으로 이뤄져 있다. 그런데 과연 이러한 구름 및 강수 메커니즘이 한반도와 주변지역에서도 주요한 원리로 작용하는지에 대한 의문이 제기되었다. 예를 들어, 강우관측위성으로 잘 알려진 TRMM 위성에서는 수동 마이크로파를 이용하여 지상강우율을 측정하게 되는데, 한반도 지역에서 TRMM 위성에 의한 강우관측자료를 분석한 결과, 강우량이 현저히 적게 측정되었다(Sohn et al. 2010). TRMM 강우추정 알고리즘은 해상이 아닌 육상에 내리는 강우를 관측할 때, 구



름 내에 존재하는 얼음 강수입자에 의한 산란 시그널을 이용한다. 분석결과는 한반도의 현저한 강우량 과소추정이 구름내 적은 얼음량에 기인함을 보여준다. TRMM 위성의 강우 알고리즘의 미국 대평원의 구름 및 강우발달을 기술하는 관측자료나 모델링 결과에 바탕을 두고 있어 구름 및 강우시스템이 다를 경우 관측 정확도 또한 차이날 것은 자명하다. 역으로 한반도에서의 추정강수량 과소추정은 한반도 강우시스템이 미국 대평원과는 크게 다르기 때문임을 유추할 수 있다. 이러한 관점에서 위성관측을 이용한 한반도 구름 및 강우시스템을 조망하며 특징을 요약하고자 한다.

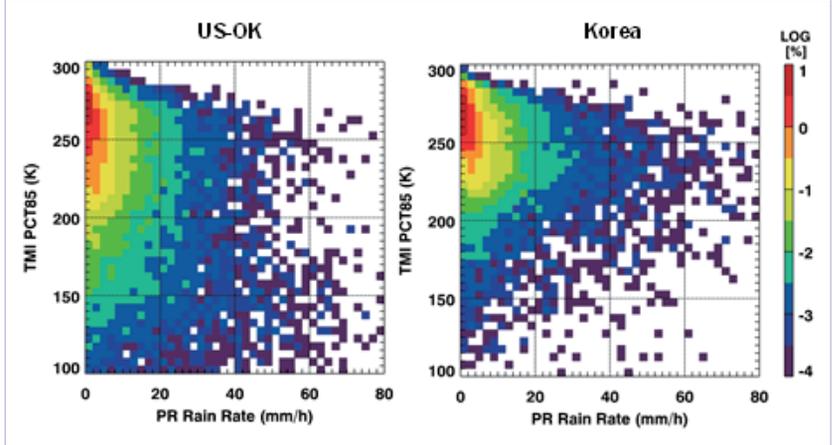
II. 한국과 미국 대평원 강우 특성 비교

다년간의 하계기간(6-8월) 동안 한반도에서 적외(IR)관측치로부터 얻은 다양한 강우량 자료를 강우계 관측자료와 비교한 결과, IR에 기초한 강우량 추정량이 현저히 적게 나타났다(Sohn et al., 2010). IR 강우산출알고리즘은 IR의 한계로 인해, 보다 성능이 우수한 TRMM 마이크로파 관측강우량에 조정 또는 스케일링을 하게 된다. 그런데, 마이크로파 관측치 자체가 현저히 적어서 스케일링하는 IR 관측치 역시 현저한 과소추정을 보이고 있다. 한반도에서 마이크로파를 이용한 강우관측 결과가 과소추정되는 문제를 이해하기 위해 한반도(34-36.25N, 126-130E)와 미국 대평원 지역에 위치한 오클라호마주(34-36.25N, 100-96W)를 대상으로 1998-2014년 여름철(6-8월)에 관측한 TRMM 85GHz 편광보정온도(Polarization-corrected temperature at 85 GHz; PCT85)를 비교하였다(그림 1). TRMM 육상 강우 알고리즘은 미국 대평원 지역에서의 강우 및 구름계를 대표한다. PCT85는 육상에서 강수량을 산정하는데 중요한 인자로 주로 구름 상부의 얼음에 의한 마이크로파 산란 정도를 나타낸다. 즉, 키가 크고 매우 잘 발달된 비구름은 구름 상부에 많은 얼음이 존재하여 산란이 커지고 그에 따라 PCT85는 낮게 나타난다. 그래서 낮은 PCT85를 강우량으로 환산할 수 있다. [그림 1]은 미국 오클라호마주(US-OK)와 한반도에서 얻은 PCT85 온도와 각 값에 해당하는 TRMM 레이더 산출 강우량의 분포를 보이고 있다.

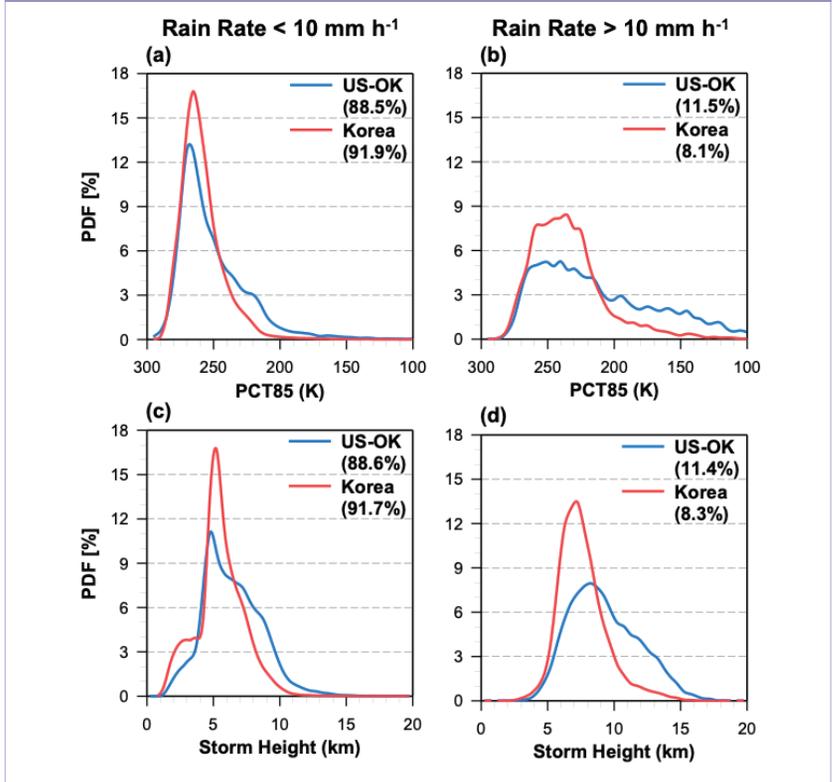
[그림 1]에서 20mm/hr 이상의 강한 강우량을 살펴볼 때 미국 오클라호마에서는 PCT85 온도가 200K 이하의 낮은 온도를 기록한 반면, 한반도에서는 비교적 온도가 높은 약 240K 부근에서 최대가 나타나는 분포를 보이고 있다. 같은 강우강도라 할지라도 한반도 상공의 비구름은 구름내 빙정의 양이 상대적으로 적음을 시사하고 있다. 이는 구름내 상승운동이 상대적으로 작아 구름의 키가 낮은 강우시스템에서도 호우가 발생함을 의미한다.

TRMM 강우레이더(TRMM PR)은 위성고도에서 마이크로파를 방출하여 구름층에서 반사된 시그널을 관측한다. 이렇게 얻은 반사도는 연직으로 분포한 구름물 상태의 정보를 제공하게 되는데, 15dBz의 반사도가 나타나는 고도를 스톱고도(storm height)라고 정의하고 있다. [그림 2]는 1998-2014년 여름철(6-8월) 동안 강수율

[그림 1] 미국 오클라호마(좌)와 한반도(우)의 1998-2014년 여름철(6-8월) 관측한 PCT85 온도와 TRMM 레이더 산출 강우량 분포



[그림 2] 미국 오클라호마와 한반도의 1998-2014년 여름철(6-8월) 동안 강수율 10mm/hr 기준 약한 강수와 강한 강수에 대한 PCT85와 스톱고도 분포



다
다



10mm/hr을 기준으로 약한 강수와 강한 강수에 대한 PCT85와 스톱고도의 분포를 보여준다. [그림 2]에서 두 지역 모두 약 90% 비율로 10mm/hr 이하의 강수가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 한반도에서는 PCT85 온도가 270K 부근에서 뚜렷하게 최대를 이루며, 이때의 고도는 5-6km이다. 한반도에서 스톱고도가 6 km 이상이 되는 강우시스템은 그 수가 급격히 감소하며, 대부분 10km 이하의 스톱고도를 보인다. 이에 비해 오클라호마는 5km 부근에서 최대를 보이 나 고도에 따라 점차 감소하는 양상을 나타낸다.

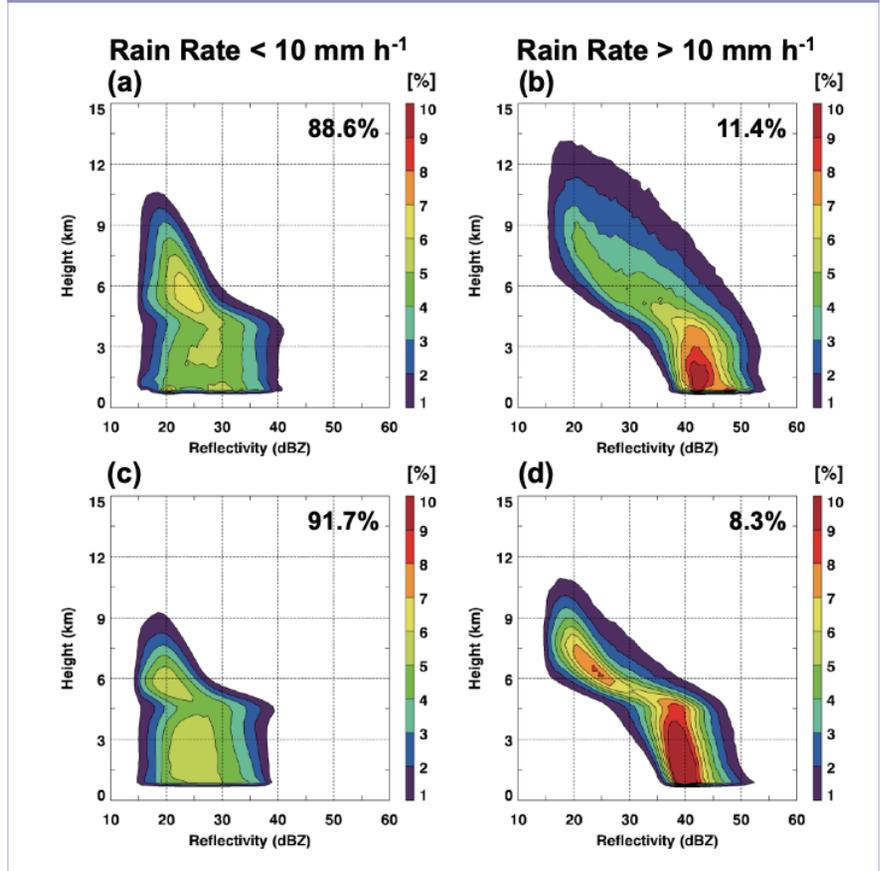
약 10% 정도를 차지하는 10mm/hr 이상의 강우율을 보이는 강한 강수사례에서는 한반도의 경우 240-260K 온도대에서 최대 분포를 보이고 있고, 온도가 하강하면서 발생빈도가 급격히 감소하여 220K 보다 낮은 PCT85 빈도는 매우 적다. 오클라호마에서는 250K 부근의 온도분포를 갖는 강우시스템 확률이 현저히 낮으며, 낮은 온도를 나타내는 빈도가 한반도에 비해 높게 나타나고 있다. 이러한 대조는 스톱고도에서도 나타나고 있다. 한반도의 호우는 대다수가 10km 이하를 기록하는 반면, 오클라호마에서는 10km 이상의 스톱고도를 갖는 큰 키의 호우시스템이 상대적으로 많이 발생함을 보여주고 있다. 즉, 한국에서 나타나는 호우시스템은 오클라호마 지역에서 나타나는 시스템에 비해 스톱고도가 현저히 낮고, 스톱에 포함된 빙정량이 적은 특징을 가지고 있다.

[그림 2]에 나타난 구름의 통계적 분포와 관련하여 구름의 연직분포는 어떠한 차이가 있는지 알아보기 위해 TRMM 강우레이더에서 관측한 반사도 빈도의 연직분포를 강우율 10mm/hr 기준으로 [그림 3]에 나타내었다. 약한 강수를 기준으로 두 지역에서 나타난 반사도 분포의 경우 오클라호마 강우가 비교적 키가 큰 형태임에도 불구하고, 매우 유사한 분포를 보이고 있다. 즉, 용융고도로 보이는 5km 고도에서 상대적으로 큰 반사도가 나타나는 연직 방향의 등치선을 보인다. 이는 두 지역 모두 층운형의 구름에서 약한 비가 내리고 있음을 시사하고 있다.

강한 강수에서는 두 지역이 매우 다른 모습을 보인다. 특히, 용융고도보다 높은 고도에서 나타나는 반사도의 분포를 들 수 있는데, 한반도는 5km 이상에서 나타나는 스톱고도의 빈도가 고도에 따라 급격히 감소한다. 반면, 오클라호마는 그 빈도의 감소가 서서히 일어나 한반도에 비해 매우 높은 고도까지 위치하고 있음을 알 수 있다. 대비되는 또 다른 현상의 하나는 5 km 고도 이하에서 나타나는 빈도의 분포 양상이다. 오클라호마에서는 연직방향으로 분포하

는 반사도를 보이고 있으나, 한반도는 지상에 가까워질수록 반사도가 증가하는 경향을 가지고 있다. 어떤 두 층의 반사도 변화는 강수율의 변화를 의미한다. 지상에 가까워질수록 커지는 한반도의 반사도의 분포는 강우 입자가 지상에 가까워질수록 성장하고 있음을 나타낸다. 즉, 한반도에서의 호우는 하강하는 얼음입자가 용융고도에서 물방울로 바뀐 후 5km 이하의 층에서 충돌과 병합과정에 의해 빠르게 성장하여 호우를 유발할 수 있음을 해석할 수 있다. 이에 비하여 오클라호마는 전통적인 강우시스템에서 나타날 수 있는 반사도 형태를 보인다. 강한 상승기류로 구름입자의 연직수송이 이루어지고, 상승과 더불어 풍부한 얼음입자가 형성된 후 강우입자로의 성장과 하강을 통해 호우로 성장하는 강수기구를 만족하는 것으로 보인다.

[그림 3] 미국 오클라호마(위)와 한반도에 대해 강우율 강도로 구분한 PR 반사도의 CFADs(Contoured Frequency by Altitude Diagrams). 확률은 각 강우 유형의 발생 확률



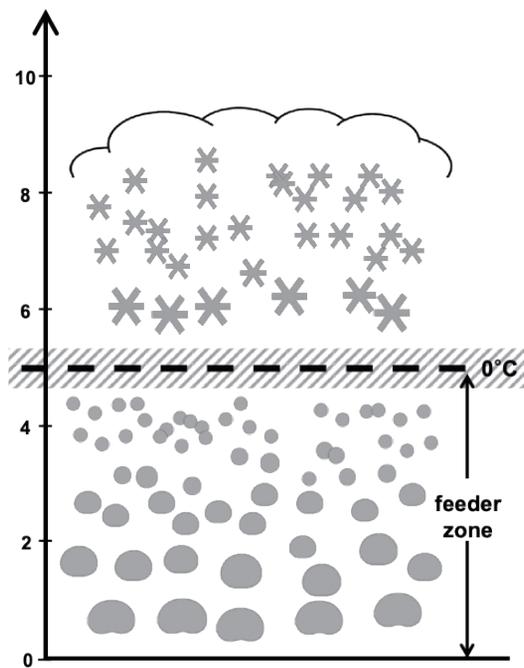
III. 한반도에서 나타나는 강수유형: 온난형 vs. 한랭형

1998-2014년 동안의 TRMM 강우관측 위성자료 분석결과는 한반도 부근에서 강우의 키



가 상대적으로 낮고 물입자가 풍부한 구름에서 일어나는 결론에 도달하게 한다. 이는 일반적으로 가정하는 키가 크고, 상승운동이 매우 활발하며, 얼음 입자를 많이 포함하는 대류운과 다르다. 그러나, 17년 동안의 자료에는 여러 가지 강수유형이 종합되어 있으므로, 대표적인 강수유형을 분류하기 위한 노력이 시도되었다. K-means clustering 분석 결과, 한반도 주변지역의 강우가 중국대륙에서 주로 나타나는 대륙형의 ‘한랭형’과 해양지역을 대표하는 ‘온난형’ 강우로 분류될 수 있는 결과를 얻었다. 이러한 분류는 [그림 3]과 같이 반사도 연직분포에 나타난 구름의 연직구조가 한랭형과 온난형 두 구조로 나뉠 수 있음을 보여준다. 한반도 주변에서는 온난형이 주류를 이루고 있으며, 한랭형은 온난형에 비해 발생빈도가 통계적으로 낮다. 전통적인 개념과는 다른 온난형 강우의 경우, 상층에서 약한 반사도를 보이는(적은 양의 얼음 분포) 동시에 하층에서는 지면으로 향할수록 반사도의 상승이 급격히 증가하는 전형적인 형태를 보이고 있다.

[그림 4] 위성탐재 레이더의 연직반사도 관측과 구름물리 해석을 통해 얻어진 온난형 강우의 형태 개념도



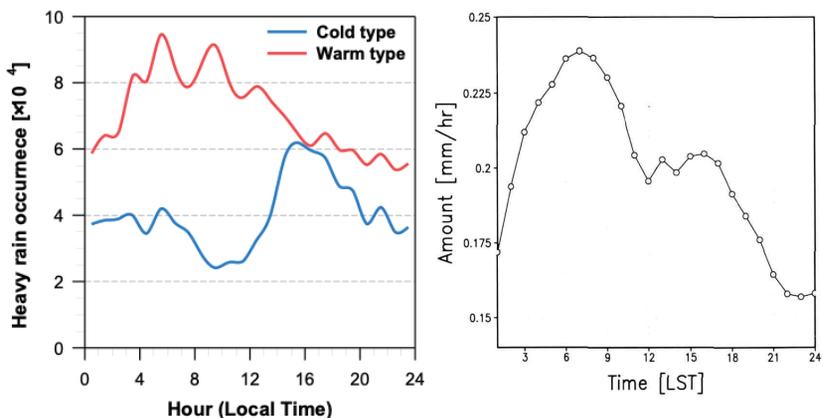
위성탐재 레이더의 연직반사도 관측과 구름물리 해석을 통해 얻어진 온난형 강우의 형태를 [그림 4]에 개략도로 제시하였다(Sohn et al. 2013). 온난형 강우의 상승운동은 강한 강우임에도 불구하고, 그리 크지 않아 구름고도가 한랭형에 비해 상대적으로 낮고, 얼음입자의 양도 적다. 온난형 호우의 경우 번개발생 빈도가 낮거나 아예 나타나지 않는 이유도 얼음의 양이 적은 구름에서 기인한다. 스톱고도가 8-9km까지 발달하며, 이때 용융고도 이상의 고도에 존재하는 얼음 고체입자는 서서히 하강을 시작하여 용융고도에 이르기까지 feeding 과정을 통해 얼음 입자가 천천히 성장하게 될 것으로 추측된다. 성장 과정을 동반한 얼음결정 입자들이 낙하하여 용융고도인 5km에 다다르면, 얼음입자가 녹아 작은 물방울이 된다. 이후 강수형태의 빗방울은 하강을 계속

하면서 하층에 풍부한 구름물과 충돌·병합과정을 일으켜 빗 방울은 매우 빠르게 성장하고, 지상에 이르면 호우를 일으킬 수 있는 강우로 성장하게 될 것으로 해석한다.

온난형 강수는 한반도에 국한된 것이 아니라, 전세계 해양지역 도처에 존재하는 것으로 파악되며, 동아시아몬순지역에서도 빈번히 나타나는 강우특성이기도 하다. 동아시아 지역으로 확장한 TRMM 자료의 K-means clustering 분석은 이러한 결론을 확실히 보여준다(Song and Sohn, 2015). 한 가지 흥미로운 사실은 한반도 하계강우의 한랭형과 온난형의 구분이 기존에 알려진 한반도 강우의 일변화를 잘 설명하고 있는 것이다. [그림 5]는 1998-2014년 동안 동아시아 몬순지역에 나타난 한랭형 강우와 온난형 강우의 일변화를 나타낸다. 한랭형 강우의 경우 오후 4시경 최대치가 나타나지만, 온난형 강우는 오전 4-10시까지 폭넓은 강수의 최대치가 나타나는 이른 오전형 강우형태를 보이고 있다. 한반도에서의 강우 일변화는 오랫동안 많은 관심사항이기도하다. Lim and Kwon(1998)은 한반도내 31개 기상관측소에서 1980-1996년 동안 관측한 4월-10월 사이의 강우 일변화를 분석하였다[그림 5]. 하루 중 강우피크가 이른 아침과 오후 4시경 두 차례 나타남을 확인할 수 있다. 오후의 피크는 잘 알려진 태양 복사에 의한 대륙형 강우 현상을 설명하지만, 이른 아침에 나타나는 가장 큰 피크의 원인은 오랫동안 잘 알려지지 않았다. 한반도에서의 강우가 대륙형인 한랭형과 해양형인 온난형이 혼합되어 나타남을 최근의 위성관측 연구에서 확인해 볼 때, 한반도에서 아침에 나타나는 강우의 최고치는 해양성을 가지는 강우형태임이 확실하다.

한편 Kar and Ha(2003)는 한반도의 하계 월평균 구름-지상 번개발생 빈도를 월 평균강우량과 비교하였다. 한 지역에서 낙뢰 1회당 강우량을 계산해 본 결과, 한반도의 하계 강우형태는 미국대평원 지역과 달리,

[그림 5] 1998-2014년 동아시아 몬순지역에 나타난 한랭형 강우와 온난형 강우 (>10mm/hr)의 일변화(좌), 하루 동안 한반도에서의 강우 변동성(우)





그들 사이의 상관관계가 아주 약하게 나타났다. 번개가 발생하기 위해서는 강한 상승기류에 의한 얼음입자와 과냉각수적의 발생과 상승, 이들에 의한 전하의 생성과 분리가 크게 연관있음을 고려할 때, 물입자 형태를 주로 이루고 상승기류가 약한 온난형 강우 형태에서는 번개가 잘 형성되지 않을 것이다. [그림 5]에서 보이는 것처럼 한반도의 강우가 이른 아침에 주로 내리는 온난형에 주도되고 있음을 고려할 때 Kar and Ha(2003)가 밝힌 번개발생과 강수량 사이의 약한 관련성이 설명될 수 있다. 기상청은 강한 비가 예보될 때마다 번개와 뇌우가 동반된다고 발표하는데, 과히 옳은 이야기는 아닌 듯하다.

뿐만 아니라 한반도의 우박 현상은 봄가을 오후 4시경에 가장 많이 나타나고 있다. 하계 동안 강수량이 집중됨에도 불구하고 우박은 연중 최소로 나타난다. 한반도에서의 강우가 키가 작고 물구름 입자가 풍부한 구름에서 일어나는 온난형 강우가 주종을 이룸을 고려할 때, 하계의 우박발생 횟수가 최저를 보임은 우연이 아닐 것이다.

IV. 온난형 강우에서 충돌-병합과정의 역할

온난형 강우는 CAPE(Convective Available Potential Energy)가 낮아 대류불안정성으로 그 발생 원인을 설명하는 데는 어려움이 크다. 온난형 강우는 대류권 하층이 충분히 습한 상황에서 외부로부터 많은 수증기 수송과 수렴이 지속적으로 이루어질 때, 수증기는 빠르게 응결하여 하층에 다량의 구름물을 공급하게 된다. 이 과정에서 발생하는 잠열은 이미 습윤한 형태의 대기층이 대류중립안정에 가까운 대기층을 상승시키는데 큰 역할을 하지 못한다. 상승운동의 동력이 약한 것이다. 따라서 구름은 크게 성장하지 못하면서 하층에는 다량의 물구름 입자가 존재하게 된다. 용융고도보다 높은 고도에 위치한 얼음 입자가 성장하면서 하강하게 되고, 이후 용융고도 이하에 다다르게 되면 녹아 물입자가 된다. 물입자가 하강을 지속할 때, 하부에 존재하는 다량의 물구름 입자는 충돌 및 병합과정을 통해 포착해 빗방울이 급격히 성장하는 온난형 강우 성장과정을 경험할 것으로 예상된다. 따라서 온난형 강우는 충돌-병합과정이 중요한 강우입자 성장기구가 될 것이다.

온난형 강우 발생시 나타나는 충돌-병합과정의 역할에 대한 수치실험은 이러한 개념적 강

수성장 이론을 잘 뒷받침하고 있다(Song et al. 2017). WRF 모델을 이용한 온난형 강우 발생에 대한 실험결과 습도가 높아 안정도가 중립에 준한 경우 구름의 연직 성장은 더디고, 강수 입자가 용융고도 이하로 하강시 충돌-병합과정에 의해 물방울의 평균직경이 급격히 커지는 것으로 나타났다. 동시에 수밀도가 감소하는 결과를 얻어 관측에서 나타나는 온난형 강우의 특성을 대부분 재현하였다. 매우 습윤한 조건하에서 수증기의 수렴이 지속되는 경우, 이로부터 유발되는 강한 강수는 온난형으로 대기하층에서 일어나는 충돌-병합과정이 중요한 물리과정임을 입증하는 실험 결과이다.

V. 요약 및 제언

열대강우관측 위성으로 1998-2014년의 17년 동안 많은 강우관련 정보를 축적한 TRMM 자료는 저위도 전반에 대한 풍부한 강수관련 정보를 포함하고 있다. 이들 자료를 이용한 최근의 한반도 강우 특성에 대한 분석연구는 한반도 강우가 크게 해양성 온난형과 대륙성 한랭형 강우가 혼재된 형태로 존재함을 밝히고 있다. 이들의 구름물리적 특성은 매우 다를 뿐 아니라, 일변화 역시 이른 아침 최대와 오후 최대가 보이는 해양형과 대륙형의 특성을 동시에 가지고 있다. 혼재한 두 강우유형의 발생 환경, 구름특성, 지속시간의 상이함은 한반도에서 강우 예측성능 향상에 대한 방법을 제시하고 있다.

한랭형: 서해/한반도를 중심으로 잠재불안정성이 큰 대륙형 강우 형태로 사전예측 시간이 촉박한 것처럼 보이나, 역으로 잠재불안정의 발달이 선행되어야 하는 과정이 필요하여 오히려 예보를 위한 선행시간을 확보하는 것처럼 보인다. 뿐만 아니라 이미 예보에 필요한 구름모수화 등이 잘 개발되어 있는 현실을 고려하면 정량적인 강우 예측가능성은 커 보인다. 그러나 특히 서해상에서 국지대류불안정을 판단하고 이에 기인한 초단기간의 대류운 발달을 예보할 수 있는 대기 및 해양관측 자료의 부재가 강수예보정확성 향상에 걸림돌이 되는 것으로 본다. 결론적으로 서해상에서의 대기관측자료 확보와 이를 활용한 자료동화가 한랭형강우 예측에 많은 도움이 될 것으로 생각한다. 가용한 모든 위성자료의 확보·분석, 특히 구름을 투과할 수 있는 마이크로파와 구름층 위에서의 대기조건을 관측할 수 있는 적외초분광 관측자



료 활용, 최근 가용한 GPM 관측자료의 활용은 강수예측에 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

온난형: 한반도에서의 온난형 강우 발생은 동아시아의 독특한 환경, 즉 풍부한 수증기와 아열대 고기압의 위치 및 세력에 따라 이루어지는 수증기 수렴이 주된 강수 원인으로 보인다. 해양성을 떠나 지형적으로 나타나는 지속적인 수증기 수렴 측면에서 일반적인 열대성 강우와는 달라 보인다. 그러나 수증기가 다량 포함된 대기, 대규모 종관장에 의한 수증기 수렴 등의 특성은 잘 예측할 수 있는 인자여서 온난형 강우의 예측 가능성은 커 보인다. 단지 5km 이하 하층 대기에서 특히 산악효과가 존재하는 한반도에서는 즉각적이고 짧은 시간에 강한 강수를 만들 수 있는 수치모델 구름모수화, 산악효과의 개선이 강우예보의 정확도 향상에 필요한 부분이 될 것이다.

참고문헌

- Kar, S. K. and K. J., Ha, 2003: Characteristic differences of rainfall and cloud-to-ground lightning activity over South Korea during the summer monsoon season. *Mon. Weather. Rev.* 131, 2312-2323.
- Lim, G.-H., and H.-J. Kwon, 1998: Diurnal variation of precipitation over South Korea and its implication, *J. Korean Meteorol. Soc.*, 34, 222-237.
- Ryu, G.-H., B. J. Sohn, C. D. Kummerow, E.-K. Seo, and G. J. Tripoli, 2012: Rain rate characteristics over the Korean peninsula and improvement of the Goddard Profiling (GPROF) database for TMI rainfall retrievals. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 51, 786-798.
- Sohn, B. J., H.-J. Han, E.-K. Seo, 2010: Validation of satellite-based high-resolution rainfall products over the Korean peninsula using data from a dense rain gauge network. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 49, 701-714, doi:10.1175/2009JAMC2266.1.
- Sohn, B. J., G.-H. Ryu, H.-J. Song, and M.-L. Ou, 2013: Characteristic features of warm-type rain producing heavy rainfall over the Korean peninsula inferred from TRMM measurements, *Mon. Weather Rev.*, 141, 3873- 3888.
- Song, H.-J., and B. J. Sohn, 2015: Two heavy rainfall types over the Korean peninsula in the humid East Asian summer environment: A satellite observation study. *Mon. Weather Rev.*, 143, 363-382.
- Song, H.-J., B. J. Sohn, S.-Y. Hong, and T. Hashino, 2017: Idealized numerical experiments on the microphysical evolution of warm-type heavy rainfall. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 1685-1699, doi:10.1002/2016JD025637.

중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언

이규원 경북대학교 교수 gyuwon@knu.ac.kr

- I. 중규모 대류계 관측의 필요성
- II. 중규모 대류계 관측 중요 기상요소
- III. 중규모 대류계 관측망 제언
- IV. 중규모 대류계 관측 구현 방안

중규모 대류계는 수평규모에서 종관/중규모(최대 수천 km), 시간규모에서는 최대 24시간까지 지속되면서, 적운의 조직화로 성장한 적란운 구름복합체(cumulonimbus cloud complex)의 가장 큰 형태이다. 그 규모로 인하여 지속적이고 강한 호우를 유발하며, 여름철 강우의 90%이상을 차지하기도 한다. 이러한 중규모 대류계의 발생, 발달, 및 소멸에 대한 원인 규명 및 예측성 향상을 위해서는 종관 및 중규모를 아우르는 잘 조직화된 집중관측이 필요하다. 종관규모 측면에서 현재 라원존데, 수직측풍기/라디오미터 등 종관관측망의 공간거리를 100~150km로 줄여야 하고, 기상위성 및 기상레이더 산출물의 정확도를 향상시켜야 한다. 나아가 종관관측사이트 사이에 수분, 수 km의 시간 및 공간분해능으로 청천, 구름, 강수를 관측할 수 있는 수증기라만라이더 및 수직측풍기, 구름레이더, 소형이중편파레이더, 수퍼사이트(지상강수관측망) 등으로 구성·조직화된 중규모 집중관측망 구축이 시급하다. 대류시작(convective initiation)과 밀접한 관계가 있는 대기하층에서의 바람, 수증기, 온도의 수평/연직 변동성을 청천시 관측할 수 있는 신개념 장비들의 활용이 중요하다. 집중관측의 계획단계부터 중규모 대류계의 예측과 연계된 과학적인 문제를 파악하고 문제점에 최적화된 관측 실행방안, 연구방안, 그리고 현업화 방안까지 중장기로 계획되고 이를 지속적으로 추진할 수 있는 정책이 뒷받침되어야 할 것이다. 또한 부족한 리소스와 전문성을 확충하기 위하여 국제공동 집중관측 프로그램을 수행하고 관측장비 구매-운영, 집중관측-모델 개선, 관측자료 생산-활용의 선순환 구조를 구축하여 집중관측의 효율성을 증대시켜야 할 것이다. ■



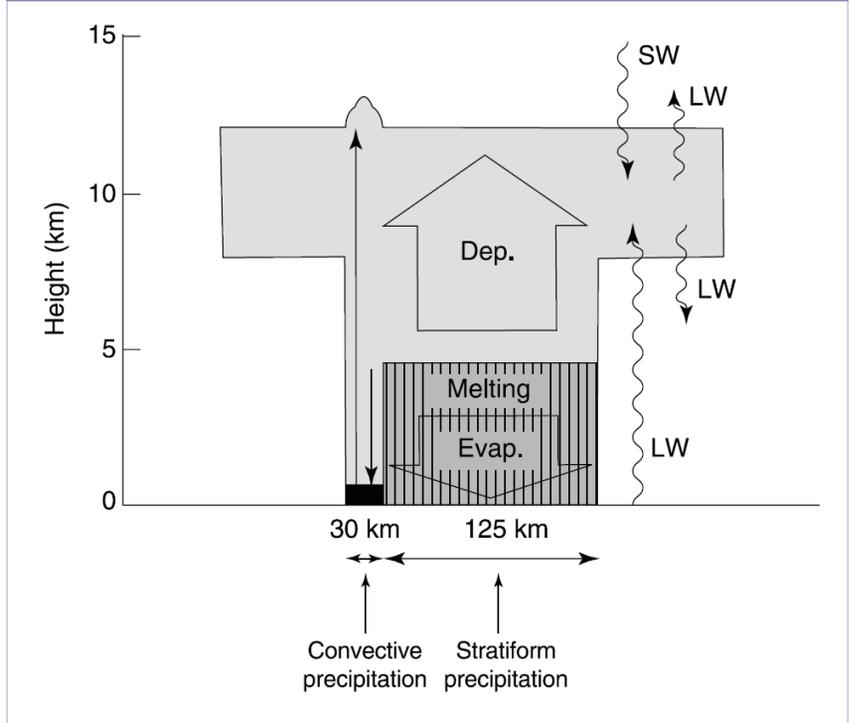
1. 중규모 대류계 관측의 필요성

한반도에서 발생하는 자연재해 중, 호우는 경제적 손실의 약 40% 이상을 차지한다. 한반도에 호우를 유발하는 주요 강수계의 유형으로 중규모 대류계(Mesoscale convective systems, MCS)에 대한 연구가 진행되었다(Sun and Lee, 2002; Shin and Lee, 2005; Lee and Kim, 2007). 일 누적강우량이 80mm 이상인 강수시스템을 기상레이더 및 위성자료에 나타나는 모양(shape)이나 공간규모, 이동방향, 조직화 구조(organizational structure) 등 현상학적 특징을 이용하여 고립뇌우(Isolated thunderstorm), 대류밴드(Convective band), 구름 클러스터(Cloud cluster), 스콜선(Squall line)의 4 종류로 구분하였다(Lee and Kim, 2007). 이러한 MCS는 열대 해양, 저위도 대륙(Nesbitt et al. 2006; Yuan and Houze 2010), 강한 경압성이 존재하는 중위도 대륙(Laing and Fritsch 1997, 2000)에서 주로 관측되고, 적도지역에서는 50%의 강우량을 차지하며 일부 육지지역에서는 전체 강우의 90% 까지 차지한다(Nesbitt et al. 2006). 특히 장기간 지속되는 중규모 대류계는 홍수를 유발하는 극한 강우사상의 대부분을 차지하고(Schumacher and Johnson 2006; Stevenson and Schumacher 2014), 우박, 낙뢰, 강풍 등 위험기상을 유발한다(Bentley and Mote 1998; Bentley and Sparks 2003; Houze et al. 1990). 한반도에서는 좁은 영역, 짧은 시간 규모에서 발생하는 국지호우사례(시간당 강우량이 30mm 이상)가 많다. 최근 연구에서는 한반도 호우를 중부, 남부, 고립형 강수계로 구분하고 그 특징을 분석하였다(Jo et al., 2020). 따라서 한반도 호우의 발달 메커니즘 이해를 위해서는 수 km에서 수천 km까지 강수계 전체에 대한 유형별 다중규모 분석이 필요하다.

중규모 대류계는 중규모 순환을 형성하여 대류를 뭉치게 하거나 큰 규모로 성장하게 하는 조직화(organization)를 통해 형성된 적란운 구름복합체(cumulonimbus cloud complex)의 가장 큰 형태라고 할 수 있다(Feng et al. 2018). 수평규모는 수 km-수천 km에 달하고 24 시간 지속가능하다. 즉, 종관 또는 중규모 현상으로 조직화 및 진화하는데 다양한 시간을 가진다. 일반적으로 MCS는 적운 및 층운형 지역으로 구성되며 성숙단계에서는 내부 중규모 순환이 발달하며, 이 순환은 보다 큰 규모에서 대기순환에 영향을 미친다. [그림 1]은 성

속기에 도달한 MCS의 구조를 나타낸다. 30km 내외의 강한 대류영역과 대류영역의 4배 이상인 층운형 강우영역이 존재한다. 대류영역은 깊은 층에서 상승기류로 인하여 연직방향의 혼합이 효율적으로 발생하며 상승기류에 의하여 응결(condensation)-침착(deposition)-상고대화(riming)의 강수과정에 의하여 잠열가열(latent heating)이 전 층에서 발생한다. 상층의 일부 강수입자는 바람시어에 의해 층운형 영역으로 수송된다. 또한 대류영역의 좁은 영역에서 강수입자의 무게(loading)로 발생하는 하강기

[그림 1] 성숙기의 열대 중규모 대류계의 모식도. LW와 SW는 장파, 단파복사, 옅은 회색은 구름, 옅은 회색에 연직 방향 선은 층운형 강수, 검은 박스는 적운형 강수를 나타냄. 직선 화살표는 적운 영역에서 상승 및 하강기류, 큰 화살표는 층운형 강수영역에서 상승 및 하강기류를 나타냄. Dep.는 침착, Melting은 용해, Evap.는 증발을 나타냄(Houze, 2004)



류에 의한 밀도류(density current)는 MCS의 전면부에 돌풍전선(gust front)을 유발한다. 하강류 지역에서는 증발에 의한 냉각(cooling)이 발생하여 가열을 약화시킨다. 층운형 영역은 대부분 적운형 강수영역이 약화되면서 나타나거나 적운영역에서 강수입자의 수송에 의해 나타난다. 층운영역에서는 용해층 기준, 상층에서는 넓은 영역에서 중규모의 약한 상승이 나타나며 주로 침착과정에 의해 잠열가열이 발생한다. 반면 하층에서는 중규모 하강기류가 발생하고, 강우의 증발 및 용해에 의한 냉각이 발생한다. 이에 따라 강수구조 측면에서 연직으로 발달하는 좁은 영역의 강한 대류성 강수역과 넓은 영역에서 밝은피를 동반하는 층운형 강수영역이 나타난다. 또한 중규모순환 측면에서 대류영역의 강한 상승기류와 강수에 의한



하강기류, 그리고 층운형 영역에서는 용해층을 기준으로 상층의 상승 및 하층의 하강 기류가 명확하게 나타나는 독특한 이중 연직구조를 보인다. MCS의 수평규모는 이러한 적운형 강수 영역에서의 강수 형성률과 층운형 강수영역에서 강수의 소산 균형에 의하여 결정된다. 따라서, MCS의 원인규명 및 진화를 이해하기 위해서는 이러한 MCS 내의 역학장 및 강수장의 복잡한 부구조(sub-structure)를 분해할 수 있는 관측이 필수적이다.

또한, 모루운(anvil) 영역은 층운형 강수영역보다 더 넓은 지역에서 나타나며, 강수를 동반하지는 않고, 상층운으로 얼음상의 강수입자로 구성되어 있다. 따라서 모루운 영역에서는 복사플럭스(radiative flux)의 수렴이 발생하고 MCS의 상부는 가열된다. 특히 MCS의 수명이 길고 얼음구름이 넓게 분포할 경우, 상층가열이 가속화되어 고도에 따른 가열곡선의 모양이 바뀐다. 적운형 강수영역에서는 깊은 층에서의 상승기류에 의한 강수과정과 하층에서의 증발 영향으로 대기 전층에서 가열이 나타나고 용해층 근처에서 최대 가열이 나타나는 가열곡선을 보인다. 반면, 층운형 강수영역에서는 용해층을 기준으로 상층은 침착에 의한 가열, 하층에서는 용해와 증발에 의한 냉각을 나타내는 이중구조 가열곡선을 보인다. 모루운 영역이 넓어지고 장시간 지속되면 복사플럭스 수렴에 의한 가열이 강화되어 층운형 강수영역에서 나타나던 상층가열의 최대치가 더 높은 곳으로 이동하게 되어 가열곡선의 연직모양이 바뀌게 된다. 비단열과정에서 가열곡선의 연직경도 변화는 잠재와도(potential vorticity)의 변화를 야기하여 층운형 강수가 강한 영역의 중-상층에서 중규모 대류소용돌이(mesoscale convective vortex, MCV)를 생성하고 MCV는 큰 규모의 대기순환을 변화시키는 요인으로 작용한다. 따라서 MCS 내부의 강수구조, 역학구조, 그리고 열역학 구조를 관측하고 이해하는 것은 MCS의 예측정확도와 직결된다고 할 수 있다.

II. 중규모 대류계 관측 중요 기상요소

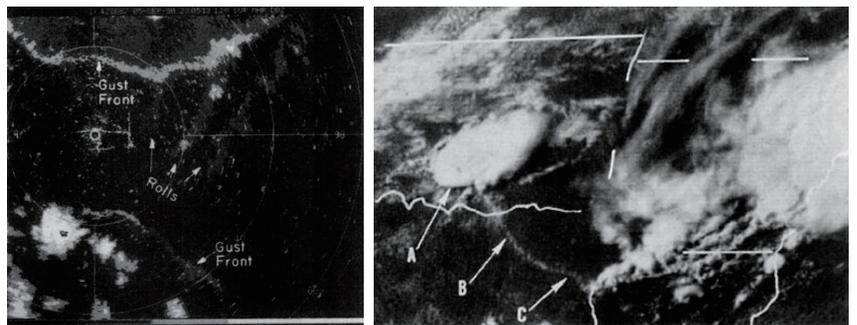
중규모의 대류계는 수평 규모가 수백 km-수천 km이며, 종관(수백 km-수천 km) 및 중규모(수 km-수백 km)를 아우른다. 일반적으로 종관규모에서는 저고기압에 대한 수일 동안의 변화를 다루며, 상승 공기속도는 수-수십 cm/s 정도로 약하게 나타난다. 중규모에서는 상승공기

속도 값이 크고 바람, 온도, 수증기 등의 변동성이 심하다. 특히 강한 상승 공기 속도는 지표면 근처 기상변수들의 강한 수평 및 연직경도를 해소하고 이러한 기상요소를 재분배시킴으로써 위험기상을 유발한다. 따라서 중규모 대류계의 관측 및 감시는 곧 수천 km-수 km의 수평규모 범위에서 바람, 온도, 및 수증기 등의 수평·연직분포를 관측함으로써 수평 및 연직기울기를 이해하는 것이다.

NRC(2009)의 연구결과에 따르면, 미국의 경우 종관 관측망은 잘 갖추어져 있지만, 국가차원의 중규모관측망은 거의 갖추어져 있지 않을 뿐만 아니라 지역적 편차가 매우 크다. 특히 고도에 따른 성분, 즉 다양한 고도에서 대기상태를 관측하는 능력은 매우 부족하다고 지적하였다. 또한 중규모 관측능력은 정량(quantity), 품질(quality), 자료가용성(accessibility), 장비세트(instrument set), 사이트 선정(site selection), 메타자료(metadata) 등 6개 분야에서 지역적인 편차가 심하고 이의 향상이 시급함을 강조하였다(NRC, 2009). 한국은 매우 많은 수의 기상 관측지점을 보유하고 있어 지점간 평균 수평거리가 10-15km에 불과하다. 하지만 이러한 조밀한 지표망을 중규모 관측망으로 활용하기 위해서는 6개 분야 측면에서 상세하고 체계적인 검토 및 최적화가 필요하다. 또한 고도에 따른 대기상태의 관측능력이 매우 부족하다. 지표면 10m 위 하층 대류권 관측은 라디오미터 및 수직측풍기망, 기상레이더망, 존데관측망 등이 전부이다. 이들 관측망의 수평 거리는 100km 이상이며 균질하지도 않아 중규모보다는 종관규모 관측으로 보는 것이 더 적절하다.

원격탐사기법의 발달은 다양한 규모에서 발생하는 대류 시작(convective initiation)의 관측을 가능하게 하였다. 감도가 향상된 기상레이더는 청천에서 발생하는 적운을 관측할 수 있다. [그림 2]는 발달하는 뇌우에 의해 유도된 돌

[그림 2] (왼쪽) 레이더 반사도 영상. 두 개의 돌풍전선과 대류성 수평 구름열과 연관된 청천 선형예코. Wilson and Mueller(1993)에서 인용, (오른쪽) GOES-1으로 관측한 1km 분해능 가시영상. 경계면에서 나타나는 호형 구름(arc cloud, B)과 호형 선의 끝에서 발생하는 대류운(A)(Purdom, 1976)





풍전선(gust front)과 대류구름열(convective roll)을 관측한 레이더반사도 영상이다. 선형의 돌풍전선과 돌풍전선에서 떨어진 지점에서 발달하는 구름이 관측되었다. 높은 분해능의 위성가시영상 또한 여름철 발달하는 적운을 관측할 수 있게 하였다. [그림 2]의 오른쪽 가시영상에서는 호 모양의 적운 구름열(B)이 관측되며 호의 가장자리(A)에서 뇌우가 발달한다. 기상레이더에서의 청천에코 관측 및 위성영상에서 적운관측정보는 대류 또는 뇌우발달의 전조(precursor)로 활용된다. 관측영역에서 고분해능 영상의 시간연속성 및 레이더의 도플러 시선속도 등을 활용하여 산출된 바람장 정보는 뇌우발달에 대한 매우 중요한 정보로 활용될 수 있다.

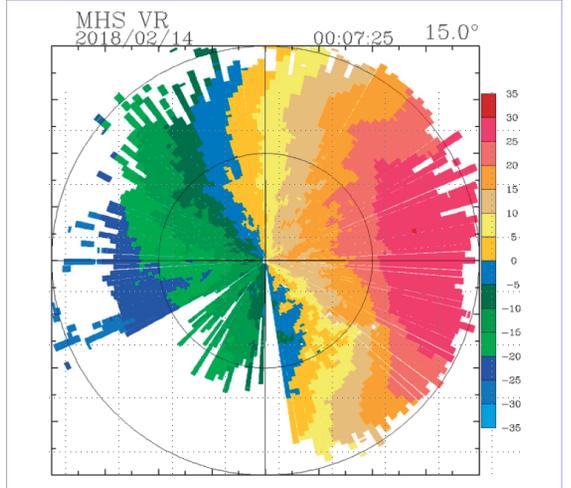
대류운의 발달은 저층공기(air parcel)가 자유대류고도(level of free convection)까지 도달할 수 있는가와 포화에 도달할 수 있는가로 결정된다. 공기상승과 연관된 역학 및 열역학적 조건이 모두 관측되어야 한다. 열적 직접순환 측면에서 대류를 본다면 저층공기를 자유대류까지 올릴 수 있는 바람의 관측, 포화고도, 및 자유대류고도를 결정하는 수증기 및 온도 프로파일의 관측이 필수적이다. 대류시작(convective initiation)을 감시 및 예측하기 위해서는 지표면에서 토양온도 및 토양수분 관측, 지상 자동기상관측망을 이용한 지표면 근처에서는 수증기 및 기온 관측, 라이더를 통한 고도에 따른 수증기 및 온도 프로파일 관측, 그리고 수직측풍기망 또는 도플러 라이더망을 활용한 저층 상층 바람장 관측을 활용해야 한다. 이를 통해 대기경계층의 진화를 추적하고 연직공기속도, 자유대류고도, 및 대류가용위치에너지(convective available potential energy)를 산출할 수 있어야 한다.

최근 미국 국립아카데미에서는 다양한 분야에서 요구되고 있는 기상자료 관측에 대한 종합적인 연구를 진행하여 위험기상의 정량적인 강수예측 및 예보를 위해 가장 중요하고 시급한 관측으로서 원격탐사에 기반한 대기경계층에서의 수증기 및 온도 고도에 따른 고분해능 프로파일을 지적하였다(NRC 2009; NRC 2010; Everett 2018). 또한 여름철에 열적으로 발달하는 대류 구름열이 자유습윤대류(free moisture convection) 및 뇌우를 유발할 수 있으며, 자유대류 생성 유무는 대기경계층에서 바람, 수증기, 온도의 수평·연직구조 변동성에 매우 민감함을 보였다(Weckworth, 2000; Sun and Crooks, 2001). 즉, 바람, 수증기, 및 온도의 수평·연직 변동성이 존재하며, 이러한 미세한 변동성은 대기경계층에서 부력플러스

(buoyancy flux)의 변동성을 야기하여 궁극적으로 대기경계층의 높이를 결정함으로써 뇌우 발달을 지배한다. 따라서 변동성에 따른 대류의 생성 및 뇌우로의 진화를 예측하기 위해서는 1km보다 작은 수평분해능, 50m의 수직분해능으로 바람, 수증기, 온도의 기상변수에 대한 정확한 관측이 요구된다.

구름 및 강수 발생시 기상레이더, 특히 구름레이더망 또는 소형 이중편파레이더망으로 대기경계층 및 대류권 하부에서의 상세 3차원 바람장 관측이 가능하다. 구름이나 강수가 존재하지 않을 경우, 청천에 대한 관측이 가능한 수직측풍기가 활용되지만, 3차원 바람장보다는 연직프로파일만을 제공하여 활용에 한계가 있다. 풍력 및 공항에서 주로 활용되던 도플러레이더가 최근 기상관측에 본격적으로 활용되면서 청천시 3차원 바람관측이 가능하게 되었다. 특히 레이저 이용을 통해 공간적으로 매우 높은 분해능(수 m)의 관측이 가능하다. [그림 3]은 평창동계올림픽 기간 중 청천시 관측한 고도각 15°의 도플러레이더 PPI (plan position indicator) 영상으로 고도에 따른 순전과 동편에서 강한 바람(붉은색)을 잘 표현하고 있다. 도플러레이더 여러 대를 네트워크로 설치하면 다중 도플러분석을 통하여 대기경계층 및 대류권 하층에 대해 고분해능의 바람장을 산출할 수 있다.

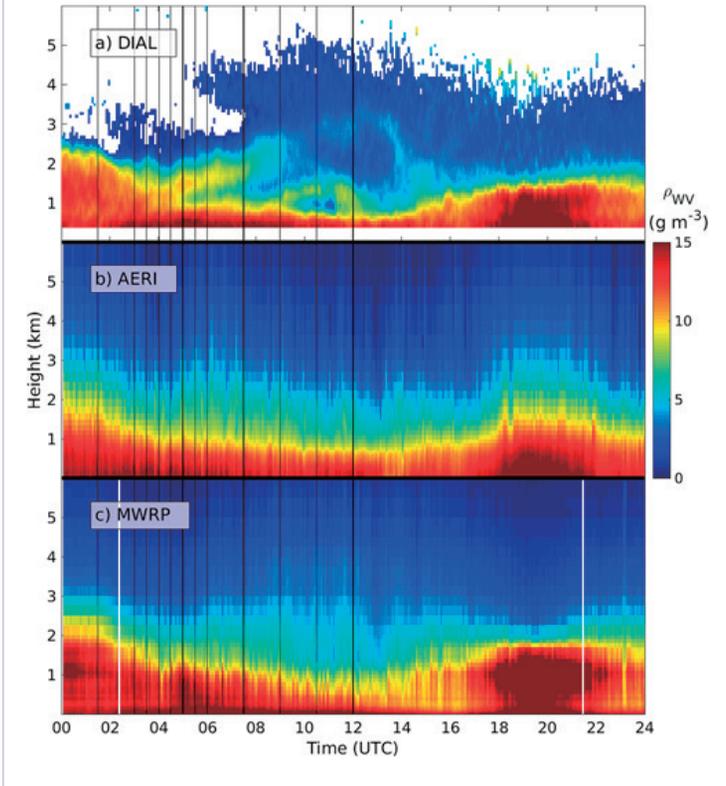
[그림 3] 평창동계 올림픽 기간 동안 메이힐즈 수퍼사이트에 설치된 레이더로 관측한 2018년 2월 14일 0600UTC 도플러 시선속도 영상(원은 각각 반경 2km, 4km)



대기경계층에서의 온도 및 수증기를 관측할 수 있는 기술로는 수증기레이더(water vapor micropulse differential absorption lidar, DIAL), 라만레이더(Raman lidar), 복사간섭계(Atmospheric Emitted Radiance Interferometer, AERI), 라디오미터(microwave radiometer profiler, MWRP), GPS(ground-based global positioning system receiver) 등이 있다. 기상청에서는 수직측풍기 사이트에 MWRP를 동시에 설치하여 운영 중이지만, 보정 문제로 인해 자료의 안정도가 떨어지고 원리상 연직분해능이 낮을 뿐만 아니라, 연직으로 평활화된 자료를 제공하여 대기경계층에서 상세하고 정확한 값을 요구하는 MCS 감시



[그림 4] DIAL, AERI, MWRP로 관측한 비습(Weckwerth et al., 2016)



및 예측에는 적절하지 않다. AERI 또한 MWRP와 유사한 특성을 가진다. 최근 개발된 라만라이더나 수증기라이더는 능동원격탐사 장비로 공간분해능이 뛰어나 상세 연직구조를 잘 관측한다. [그림 4]는 동일한 장소에서 동일한 시간에 DIAL, AERI, MWRP로 관측한 비습의 연직프로파일로 MWRP, AERI 모두 평활화된 연직분포를 보이는 반면, DIAL은 수증기의 상세구조 변화를 잘 관측하였다. DIAL은 미국 국립기상연구소에서 개발되어 현재 다양한 집중관측에서 실험 중이며 라만라이더는 상용화되었다. 또한 최근에는 수동원격 탐사인 AERI, MWRP의 한계를 극복하기 위하여 능동탐사 장비인 DIAL 자료와 동시에 활용하여 그 정확도를 높이고 있다.

III. 중규모 대류계 관측망 제언

중규모 대류계 관측에서 고려할 주요 사항은 1)중규모 대류계의 수평-수직규모, 2)현상의 이해 및 예측을 위한 주요 기상변수, 3)장비별 대기상태에 따른 관측 가능 변수이다. 대기상태의 측면에서 청천, 구름, 강수의 전천후 관측을 통한 MCS의 발생-성장-소멸의 생애 전주기를 관측이 요구된다. 종관규모 관측망은 라원존데, 수직측풍기, 기상레이더망, 기상위성 등으로 비교적 잘 구성되어 있다. 바람, 온도, 수증기를 제공할 수 있는 장비의 공간 평균 이격거리는 변수들의 공간 상관성 분석을 통하여 도출할 수 있지만, 해외 관측망의 예시를 보면 약

100-150km 정도이다. 현재 라윈존데망의 이격거리는 이보다 더 큰 값을 가지며 내륙산악지역 및 서남해상에서 수 개소의 보강이 시급하다. 현재 운영 중인 라디오미터의 보정 및 품질 관리를 통한 온도 및 습도의 정확도 향상이 병행되어야 한다. 또한 수직측풍기는 종관규모에서 청천시 유일하게 대기 하층에서 높은 시간분해능 바람 프로파일을 제공하므로, 이 규모에서 MCS 생성에 대한 환경을 제공하는 매우 중요한 장비이다. 따라서 품질 및 자료정확도 향상을 위하여 분석장 생성에 적극 활용하여야 한다. GK-2A 위성의 채널수 증가는 온도 및 수증기 프로파일 특히, 대기경계층에서 이들 변수의 정확도를 향상시킬 것으로 기대된다. 또한 최근 완성된 기상청 이중편파레이더망을 이용한 정량강수 추정, 강수시 3차원 바람장 및 강수유형 정보는 종관 및 중규모 현상에 대한 상세정보를 제공할 것이다. 이 규모에서 구름 관측 및 구름 생성시 대기상태에 대한 관측은 절대적으로 부족하다. 구름의 내부관측은 구름 레이더로 가능하지만 관측거리가 짧아서 이 규모의 관측망으로는 부적절하며, 위성의 2차원 구름정보와 다채널정보를 이용한 구름내부 기상변수 산출이 필수적이다. 또한 하드웨어 및 신호처리기술의 향상으로 이중편파레이더의 관측민감도가 향상되고 있어 강한 구름에 대한 정보를 제공할 것으로 기대한다.

종관규모에서 MCS 생성에 대한 기본 대기조건을 파악한다면, 이보다 작은 중규모 집중관측망에서는 구름생성 및 발달, 뇌우 조직화(organization), MCS 성숙 및 소멸에 대한 상세관측이 필요하다. 앞 절에서 언급하였던 대류 및 뇌우 발달의 초기 조건, 즉 대기경계층에서 바람, 온도, 수증기의 수평-연직분포가 중요하며, 뇌우 조직화 이후는 강수관측이 필수적이다. 중규모 집중관측망은 라윈존데 사이에 존재하는 상세관측망이므로 100-150km의 영역이며, 시공간 분해능은 수분 및 km 이하가 요구된다.

〈표 1〉은 중규모 집중관측망에 활용될 수 있는 관측장비별 관측변수, 관측변수의 대표성 영역(지점 관측이 대표할 수 있는 영역) 또는 관측범위, 장비별 관측 가능한 대기상태를 나타낸다. 최근의 기술발달로 현업에 적용가능한 장비로 구름레이더 및 도플러레이더가 있다. 구름레이더는 종관규모에서 제공되지 못했던 구름에 대한 미세물리 및 바람장 정보를 제공한다. 도플러레이더는 현재 기상청에서도 연구용으로 운영 중이지만 대부분 저출력 시스템으로 관측영역이 수 km 이내로 제한된다. 미국 및 유럽 등에서 공항 윈드시어 관측용으로 운영



〈표 1〉 기상 장비별 관측 변수, 관측범위, 및 관측이 가능한 대기 상태

| 장비 | 관측변수 | 대표 또는 관측 범위 | 관측 가능 대기상태 | 비고 |
|--------------|---------------------|-------------|------------|-----------------------|
| 지상관측 | 압력, 바람, 온도, 수증기 | 수 km | 전천후 | 수증기/라만 라이더와 상호보완 |
| 라원존데 | 압력, 바람, 온도, 수증기량 | 30-50km | 전천후 | 수직측풍기와 상호보완 |
| 수직측풍기 | 바람 | 30-50km | 전천후 | 라원존데와 상호보완 |
| 위성 | 바람, 온도, 수증기, 구름, 강수 | 반구 | 구름/강수 | 종단 및 meso- α |
| 대형이중편파레이더 | 바람(강수), 강수 | 반경 150km | 강수 | meso- α/β |
| 소형이중편파레이더 | 바람(강수), 강수 | 반경 30-50km | 강수 | meso- β |
| 구름레이더 | 바람, 구름 | 반경 10-15km | 구름 | 수퍼사이트 주위 관측 |
| 도플러레이더 | 바람(청천) | 반경 3-10km | 청천/약한 구름 | 수퍼사이트 주위 관측 |
| 수증기레이더/라만레이더 | 온도, 수증기(연직분포) | 고도 3-7km | 청천/약한 구름 | 수퍼사이트 주위 관측 |
| 연직지향레이더 | 강수(연직구조) | 수 km | 강수 | 강수 주흐름/수직방향 소형레이더로 보완 |
| 우적계 | 입자크기분포 | 수 km | 강수 | 강수 주흐름/수직방향 소형레이더로 보완 |
| 강수계 | 강수량 | 수 km | 강수 | 균일 분포 소형레이더로 보완 |

중인 시스템은 대부분 고출력 시스템으로 청천 및 구름시 10km이상 영역에서 3차원 바람장을 제공한다. 또한 최근 주목을 받고 있는 수증기레이더/라만레이더는 대기하층에서 상세 온도 및 수증기 프로파일을 제공하여 대류시작(convective initiation) 감시를 위한 필수 장비이다.

중규모 대류계 집중관측망 영역은 100km×100km, 공간분해능은 1km, 시간분해능은 < 5min (라원존데 관측 < 3h)을 만족하여야 한다. 라원존데, 수직측풍기, 소형기상레이더의 관측값이 대표성을 가질 수 있는 관측범위는 30-50km이다. 따라서 이들 장비들이 100km×100km의 영역에 대한 상세관측정보를 제공하기 위해서는 4-5개소에서 관측이 필요하다 [그림 5]. 구름레이더 및 도플러레이더는 평균 반경 10km까지 관측이 가능하다. 따라서 이 영역 전체를 관측하기 보다는 관측망의 중심에 위치한 수퍼사이트를 중심으로 네트워크를 구축하는 것이 타당하다. 또한 대기하층 온도 및 수증기 프로파일링을 위한 수증기/라만레이더는 중심 수퍼사이트, 수직측풍기 사이트에 같이 설치한다. 이러한 원격탐사관측 이외에 우적계, 우량계, 연직강우레이더를 이용한 상세 강우연직구조, 미세물리, 강수의 사-공간 분포에 대한 관측이 요구된다. 이러한 지점관측 장비들의 관측치는 약 5-10km의 대표성을 가진다.

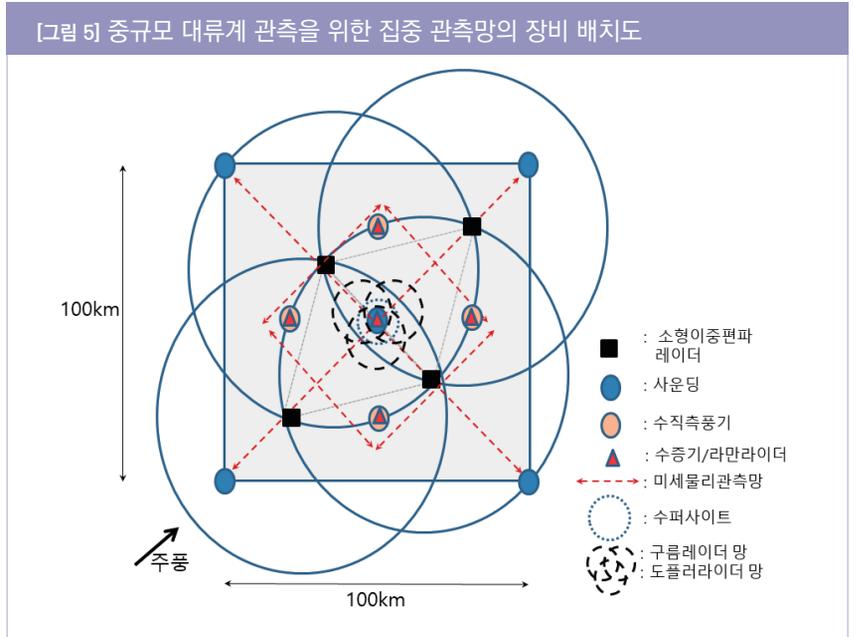
미세물리 지점관측은 강수계의 주 이동방향 및 수직방향에 대한 관측을 주로하고 고분해능의 정보는 소형기상레이더 및 구름레이더와 연계하여 산출하여야 한다.

[그림 5]는 앞에서 언급한 사항들을 고려하여 설계한 중규모에서의 중규모 대류계 집중관측망 배치도이다. 집중관측망 영역의 모서리와 중심에서 라원존데 관측을 수행하고 이를 보완하기 위하여 4지

점에 수직측풍기를 설치하여 고분해능 바람장 정보를 획득한다. 영역의 중심을 포함하여 강수의 상세 구조 및 미세물리관측을 위하여 우량계, 우적계, 연직지향레이더 장비를 주풍 방향과 이에 수직하는 방향으로 배치한다. 영역의 중심에 위치한 수퍼사이트에서는 다른 수퍼사이트 보다 다양한 장비의 설치가 요구된다. 또한 중심의 수퍼사이트 주위에 구름레이더망 및 도플러레이더망을 구축하여 강수뿐만 아니라 구름 및 청천에 대한 관측을 수행한다. 대류시작의 결정적인 역할을 하는 대기하층에서의 수증기 및 온도의 상세 프로파일링을 위하여 영역의 중심, 수직측풍기 사이트에 수증기·라만레이더를 설치한다. 이러한 청천 관측장비, 구름 관측장비, 강수 관측장비, 대기역학 및 열학장 관측장비의 종합적인 배치를 통하여 이 영역 내에서 중규모 대류계에 대한 집중적인 관측이 가능할 것이다. 이러한 중규모 대류계 집중관측망은 여름철 남부지방, 중부지방의 강우 특성을 고려하여 구축되는 것이 타당하다.

이러한 집중관측망의 구축에도 불구하고 여전히 관측공백지역으로 서해 및 남해가 존재한다. 종관규모에서 MCS 발생에 대한 대기상태를 관측하기 위하여 해상의 수 개소에서 라원존데 관측이 필요함을 언급한 바 있다. 그러나 일 4회의 라원존데 관측으로는 MCS 발달

[그림 5] 중규모 대류계 관측을 위한 집중 관측망의 장비 배치도





에 대한 시간분해가 불가능하다. 해상에 설치된 기상레이더 또한 유효관측 반경에 한계가 있다. 특히 해상에서 대류셀이 발달할 때의 대기상태, 구름 및 강수에 대한 관측에는 한계가 존재한다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위하여 선박에 원격탐사장비들(수증기/라만라이더, 구름레이더, 기상레이더 등)을 탑재하여 호우시기에 해상에서 상시관측을 진행함으로써 관측공백지역에서의 상세 정보를 확보하고 이를 활용하여 MCS의 감시 및 예측성을 향상하여야 한다.

IV. 중규모 대류계 관측 구현 방안

중규모 대류계 집중관측망 구축 및 집중관측 업무는 장비 구축에만 수백억 원이 소요되는 사업이다. 추후 장비의 지속적 운영, 유지보수 및 인력까지 고려한다면 기상청 예산의 상당 부분을 할애하여야 가능한 사업이다. 따라서 사업 실행에 앞서 명확한 필요성, 과학적인 문제점을 반드시 파악하고, 향후 중장기 계획까지 철저히 세워야 할 것이다. 현재까지 기상청 주도로 많은 집중관측이 있었지만, 집중관측에서 획득된 자료의 활용도를 고려한다면 보다 더 적극적으로 과학적인 문제를 파악하고 문제점에 최적화된 관측 실행 방안 및 이후 연구·현업화 방안까지 이어질 수 있도록 중장기계획이 수립되어야 한다. 또한 수립된 계획이 지속될 수 있는 규정 및 구조적 장치가 반드시 마련되어야 그 성과를 담보할 수 있다.

미국 과학아카데미에서 미국 전역의 관측망을 검토하고 그 한계를 명확히 정의하였음에도 추가로 제안된 것은 현 관측망의 효율성을 극대화하기 위한 지적인 활용이다. 현재 기상청과 학계에서는 일부 관측에 가능한 인프라를 이미 갖추고 있다. 특히 다양한 관측소에서 다양한 연구목적으로 운영이 되는 장비들이 현존하고 있으며 이들을 종합적·효율적으로 활용할 수 있는 방안이 먼저 고려되어야 할 것이다. 이를 가능하게 하는 것은 지금까지 관성처럼 해오던 업무에 대한 과감한 정리와 선택을 위한 정책적 결단이다.

또한 최근 관측에서 유행하는 단어는 “adaptive/collaborative”이다. 모든 일에는 리소스가 한정되어 있고 한정된 리소스를 극대화하여 최적의 결과를 도출할 수 있도록 하는 것이 적응 관측(adaptive observation)이다. 예를 들어 서해에서 대류운이 발달하고 있고, 다른

지역에는 맑은 상태를 고려해보자. 현재의 현업관측은 이러한 상황과 전국에 비가 오는 상황을 구분하지 않고, 동일한 관측을 하고 있다. 서해를 제외한 다른 지역에서 비가 오지 않음에도 비가 내릴 때와 동일한 관측을 하고 있다면 리소스 낭비가 된다. 만약 낭비되는 리소스를 활용하여 서해상의 대류운을 더 빈번하게 관측한다면 현재의 관측망에서 해결하지 못하는 문제들을 해결할 수 있을 것이다. 현재 기상청 관측망에서 적응관측이 가능한 부분을 찾아내고, 정책적으로 반영하는 것이 중규모 대류계 관측의 가장 첫 단계이다.

다음 대안으로 중규모 대류계 집중관측을 위한 국내 관측장비나 전문성이 부족하다면, 국내 가용자원을 최대한 활용하면서 국제공동 집중관측을 수행하는 것이다. 평창동계올림픽 지원을 위해 진행한 ICE-POP 2018(International Collaborative Experiments for Pyeongchang 2018 Olympic and Paralympic Winter Games) 집중관측이 그 대표적인 예이다. 국제공동 관측은 장기간의 계획과 국제협력을 위한 조율이 필요하다. 국제공동 관측에는 크게 두 가지 장점이 있다. 첫째, 기상청에서 장비를 구매하지 않고 해외장비와 전문인력의 첨단장비 운영 노하우를 습득할 수 있다. 이를 통하여 중규모 대류계 관측에 가장 적절한 장비를 파악할 수 있고 운영 노하우까지 습득하여 이후 국내 집중관측망 구축 및 운영에 활용할 수 있다. 둘째, 해외 전문가 집단이 한반도에서 발생하는 중규모 대류계에 대한 연구를 수행하고 국내 연구진과의 공동연구를 통하여 현상에 대한 원인 규명뿐만 아니라, 국내 전문성을 짧은 시간에 향상시킬 수 있다.

중규모 대류계 집중관측을 위해서는 관측장비-운영의 선순환, 집중관측-모델 개선의 선순환, 관측자료 생산-활용의 선순환 구조를 만드는 것이 필수이다. 집중관측 효율의 극대화는 목적에 맞는 최적의 장비도입과 운영의 선순환 구조가 만들어질 때 가능하다. 기상청 내에서 가장 기피하는 업무가 장비구매라고 할 정도로 기상장비의 구매에서 활용까지 전문성, 체계성이 부족하다. 특히 첨단장비의 구매에서는 더더욱 전문성이 부족한 형편이다. 목적에 적합한 장비 선정, 목적을 달성할 수 있는 정확도와 안정성을 가진 장비의 구매-설치, 그리고 장비의 특성과 구조에 기반한 체계적인 운영, 전문성을 가진 엔지니어에 의한 유지보수, 생산된 자료의 특성을 이해하고 활용할 수 있는 전문가 등이 모두 갖추어져서 피드백을 통하여 최선의 장비 상태를 유지하여 최적의 자료를 생산하는 것이 필요하다.



관측과 모델 개선의 선순환 구조 또한 중규모 대류계 집중관측을 성공적으로 이끄는 열쇠이다. 앞에서 언급하였듯이 집중관측이 관측으로 끝나지 말아야 한다. 수없이 많이 수행되었던 집중관측들의 자료가 하드디스크에서 잠자고 있다면 집중관측 설계가 잘못된 것이다. 관측, 품질관리, 관측분석장, 재분석장, 현상규명, 모델 피드백, 모델 개선에 이르는 일련의 과정이 연계되어 관측에서부터 모델까지 자료가 전달되고 이를 통한 모델 개선 또는 예측성 향상이 함께 진행되어야 한다. 또한 모델에서는 집중관측에서 부족한 부분에 대한 피드백을 제공함으로써 향후 집중관측에 반영되도록 하는 구조가 갖추어져야 한다. 집중관측이 끝나면 관심이 사라지고 다른 문제로 넘어가서 어렵게 획득한 집중관측 자료가 사장되는 일은 없어야 할 것이다.

국민의 생명과 재산에 직접적 영향을 줄 수 있는 위험기상을 파악하는데 중규모 대류계의 이해와 대응이 반드시 필요하며, 세계적 수준의 연구결과 및 활용을 위해서 집중관측의 계획 단계부터 관측 이후 연구 및 연구결과의 활용계획 수립이 필요하다. 이를 실현하기 위해서는 무엇보다 지속가능할 수 있도록 기상청의 정책적 지원이 절실히 요구된다.

참고문헌

- Bentley, M. L., and Mote, T. L., 1998: A climatology of derecho-producing mesoscale convective systems in the central and eastern United States, 1986-95. Part I: Temporal and spatial distribution. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(11), 2527-2540. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)0792.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)0792.0.CO;2)
- Bentley, M. L., and Sparks, J. A., 2003: A 15 yr climatology of derecho-producing mesoscale convective systems over the central and eastern United States. *Climate Research*, 24(2), 129-139. <https://doi.org/10.3354/cr024129>
- Cho, N.-S., and T.-Y. Lee, 2006: A numerical study of multiple convection bands over the Korean peninsula. *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 87-105.
- Everett, L., 2018: *The future of atmospheric boundary layer: Observing, understanding, and modeling.* National Academy Press, 48pp.
- Houze, R. A., 2004: Mesoscale convective systems. *Rev. Geophys.*, 42, RG4003, <https://doi.org/10.1029/2004RG000150>.
- Houze, R. A., Smull, B. F., and Dodge, P., 1990: Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma. *Monthly Weather Review*, 118(3), 613-654. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1990\)118%3C0613:MOOSRI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1990)118%3C0613:MOOSRI%3E2.0.CO;2)
- Lee, T.-Y., and Y.-H. Kim, 2007: Heavy Precipitation Systems over the Korean Peninsula and their Classification. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 43, 367-396.

- Laing, A. G., and J. M. Fritsch, 1997: The global population of mesoscale convective complexes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123, 389-405. <https://doi.org/10.1002/qj.49712353807>.
- Laing, A. G., and J. M. Fritsch, 2000: The large-scale environments of the global populations of mesoscale convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 2756-2776. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2756:TLSEOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2756:TLSEOT>2.0.CO;2)
- Nesbitt, S. W., Cifelli, R., and Rutledge, S. A., 2006: Storm morphology and rainfall characteristics of TRMM precipitation features. *Monthly Weather Review*, 134(10), 2702-2721. <https://doi.org/10.1175/Mwr3200.1>
- National Research Council, 2009: Observing weather and climate from the ground up: A nationwide network of networks. National Academy Press, 234 pp.
- National Research Council, 2010: When weather matters: Science and services to meet critical societal needs. National Academy Press, 181 pp.
- Schumacher, R. S., and Johnson, R. H., 2006: Characteristics of U.S. extreme rain events during 1999-2003. *Weather Forecasting*, 21(1), 69-85. <https://doi.org/10.1175/WAF900.1>
- Shin, C.-S., and T.-Y. Lee, 2005: Development mechanisms for the heavy rainfalls of 6-7 August 2002 over the middle of the Korean peninsula. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 683-709.
- Sun, J., and N. A. Crook, 2001: Real-Time Low-Level Wind and Temperature Analysis Using Single WSR-88D Data. *Wea. Forecasting*, 16, 117-132. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2001\)016<0117:RTLLWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2001)016<0117:RTLLWA>2.0.CO;2).
- Sun, J., and T.-Y. Lee, 2002: A numerical study of an intense quasi-stationary convection band over the Korean Peninsula. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80(5), 1221-1245.
- Stevenson, S. N., and Schumacher, R. S., 2014: A 10-year survey of extreme rainfall events in the central and eastern United States using gridded multisensor precipitation analyses. *Monthly Weather Review*, 142(9), 3147-3162. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00345.1>
- Weckwerth, T. M., 2000: The effect of small-scale moisture variability on thunderstorm initiation. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 4017-4030.
- Weckwerth, T. M., K. J. Weber, D. D. Turner, and S. M. Spuler, 2016: Validation of a Water Vapor Micropulse Differential Absorption Lidar (DIAL). *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 33, 2353-2372. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0119.1>.
- Yuan, J., and Houze, R. A., 2010: Global variability of mesoscale convective system anvil structure from A-train satellite data. *Journal of Climate*, 23(21), 5864-5888. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3671.1>

집중호우 등 풍수재 사고와 담보보험

이보영 한국화재보험협회 차장, 손해사정사 sally250@kfpa.or.kr



- I. 풍수재를 담보하는 보험상품
- II. 집중호우 사고 및 보험담보 사례
- III. 보험업계의 위험관리

I. 풍수재를 담보하는 보험상품

일반적으로 건물을 담보하는 화재보험은 풍수재위험을 담보하는 특약을 추가로 가입하는 방식이다. 일반 기업체나 공장을 가입대상으로 하는 재산종합보험은 전위험(All Risk) 담보방식으로 풍수재위험을 기본담보에 포함하고 있다. 그리고 주택이나 소상공인 상가의 경우 풍수해위험만을 담보하는 단독상품이 출시되어 있으며, 농어촌지역에서는 자연재해 발생으로 입은 피해를 보상해주는 농어업재해보험이 있다.

가. 화재보험 풍수재위험담보 특별약관

주택 및 아파트, 일반건물, 공장건물을 대상으로 하는 화재보험에서는 풍수재, 지진 등 다른 위험을 특별약관으로 추가 가입하는 것이 가능하다.



〈표 1〉 화재보험 풍수재위험담보 특별약관

| | |
|------------|---|
| 보상하는 손해 | 태풍, 회오리바람, 폭풍, 폭풍우, 홍수, 해일, 범람 및 이와 비슷한 풍재 또는 수재로 보험의 목적에 생긴 손해 |
| 보상하지 않는 손해 | <ul style="list-style-type: none"> • 풍재 또는 수재와 관계없이 댐 또는 제방이 터지거나 무너져 생긴 손해 • 바람, 비, 눈, 우박 또는 모래, 먼지가 들어옴으로써 생긴 손해 • 추위, 서리, 얼음, 눈으로 생긴 손해 |
| 자기부담금 | 1사고당 50만원을 지급될 보험금에서 공제한다. 단, 특수건물 및 주택건물은 자기부담금이 별도로 없다. |

나. 재산종합보험(Package Insurance)

재산종합보험은 여러 가지 위험들을 하나의 증권으로 묶어 전위험(All Risk) 담보방식으로 담보하는 보험상품이며, 특별히 면책으로 명시하지 않은 위험으로 인한 손해를 보상받을 수 있다.

〈표 2〉 재산종합보험 개요

| | |
|---------|---|
| 보상하는 손해 | 화재, 폭발, 풍수재, 지진, 도난, 파손 등 증권에서 면책으로 하고 있지 않은 어떠한 원인에 의해 직접적으로 또는 전적으로 기인하여 보험의 목적에 급격하고도 우연하게 발생한 직접적인 재물손해 |
| 자기부담금 | 계약조건에 따라 자기부담금을 설정하고 있으며, 해안지역에 인접하여 태풍 등의 영향을 많이 받는 경우 자연재해에 한해 자기부담금이 별도로 설정되는 경우도 있다. |

다. 풍수해보험

행정안전부가 주관하는 정책성보험으로 주택, 온실(비닐하우스 포함) 및 소상공인의 상가·공장을 대상으로 풍수해를 담보하는 보험상품이다. 보험료 일부를 국가 및 지자체가 보조함으로써 국민은 저렴한 보험료로 예기치 못한 풍수해에 대처할 수 있다.

〈표 3〉 풍수해보험 개요

| 담보위험(보상하는 재난) | 가입대상 | 보상하는 피해 |
|--------------------------------------|-----------------------------------|--|
| 태풍, 홍수 호우, 강풍 풍랑, 해일 대설, 지진 | 단독주택과 공동주택 (동산포함) | 기둥, 벽체, 지붕 등 파손 및 침수 |
| | 온실(비닐하우스포함) | 골조피해(구부러짐, 꺾임, 주저앉음, 유실) 비닐파손(비닐파손특약 가입한 경우 보상) |
| | 소상공인의 상가와 공장 (시설, 기계, 재고자산 포함) | 기둥, 벽체, 지붕 등 파손 및 침수 |

라. 농어업재해보험

정부는 농어업재해보험법에 의해 이상기후와 자연재해 등으로 농작물 및 가축(축사) 피해시 그 피해를 보전하여 주는 정책성보험을 운영 중이다. 농가의 보험가입 활성화 및 부담경감을 위해 보험료를 전부 또는 일부 지원해준다.

마. 공사보험 (조립보험 및 건설공사보험)

건설현장이나 공사현장에서 일어나는 사고를 담보하기 위해 가입하는 조립보험 또는 건설공사보험의 경우, “폭풍우, 태풍, 홍수, 범람 또는 이와 비슷한 자연재해”를 보통약관에서 담보하고 있다. 대형공사는 주로 영문약관을 사용하며 재산종합보험과 마찬가지로 면책으로 규정하고 있지 않는 한 자연재해를 담보하고 있다.

바. 기업휴지보험 (BI_Business Interruption)

화재, 폭발, 자연재해 등 예기치 못한 사고로 인해 물리적 손해가 발생할 경우 생산활동이 중단될 수 있으며 이는 이익손실로 이어질 수도 있다. 이러한 사업중단으로 인한 이익손실 및 고정비 지출액 위험을 담보하는 상품이 기업휴지보험이다.

자연재해는 시설에 심각한 피해를 줄 수 있으며 이에 따른 공급차질로 고객사로의 제품 납기 또는 서비스 제공이 불가능해 질 수 있다. 그 경우 일부 재산에 대한 물리적 피해보다 자연재해로 인한 피보험자 사업 전체에 미칠 재정적 손실이 더 커질 수 있다.

사. 간접기업휴지보험 (CBI_Contingent Business Interruption)

기업휴지보험은 일반적으로 피보험자의 구내에서 발생한 재물피해로 인한 조업중단에 따른 손실을 보상한다. 그러나 공급자 혹은 고객사의 생산 조업중단에 의해 부품을 공급받지 못하여 생산에 차질이 발생하거나 자연재해로 피해를 입은 고객사에 납품을 하지 못해 발생한 재정적 손실까지 담보하려면 간접기업휴지손해보험 추가조항을 포함하여야 한다.



II. 집중호우 사고 및 보험담보 사례

가. 2006.7.16. 집중호우로 인한 안양천 제방 붕괴

서울지하철 9호선 시공 중 집중호우로 인한 안양천 제방 붕괴사고로 공사현장이 침수되었다. 000공구 61억 원, 000공구 57억 원의 손해가 발생하였으며, 건설공사보험에서 이를 담보하였다.

[그림 1] 안양천 제방붕괴



출처: 데일리안

나. 2011.7.27. 집중호우로 인한 우면산 산사태

서울 및 경기북부에 300mm 이상의 집중호우로 우면산에 산사태가 발생하며 침수 및 인명피해가 발생하였다. 또한 산사태로 밀려든 토사는 방배동 소재 아파트 및 전원마을 단지에 큰 피해를 입혔다.

아파트의 경우 공동주택보험에 가입해 있고 풍수재담보특약도 들어있어 보험으로 보상을 받을 수 있었으나, 전원마을의 경우 개별적으로 보험에 가입되어 있지 않은 경우 국가 재난지원금 외 보상이 없었다. 또한 산사태 발생 후 근처 차량들이 침수되었고 자동차보험 자기차량손해담보에 가입된 차량에 보험금이 지급되었다.

[그림 2] 집중호우로 인한 우면산 산사태 피해



출처: 동아일보



출처: 중앙뉴스

다. 2017.7.18. 폭우로 인한 침수

충청북도에서는 폭우로 사망자 및 실종자 7명과 445명의 이재민이 발생했다. 주택 및 비닐 하우스에도 폭우로 인한 피해가 발생하였으며, 이 중 행정안전부가 관장하는 풍수해보험은 가입자에게 149건, 약 6억 2,000만 원의 보험금을 지급하였다. 행정안전부의 보도자료에 따르면

[그림 3] 충청북도 폭우로 인한 주택과 사업장 침수



청주지역 주택침수

출처: 연합뉴스



청주지역 사업장 지하 보일러실 침수(우측은 사고당시 모습)

출처: 중앙뉴스

주택이 전파되었을 경우 풍수해보험 미가입자는 재난지원금으로 900만원이 지원되는데, 일반 가입자의 경우 연간 보험료 48,600원 중 국민부담분 21,800원(45%)만 납부하면 7,200만 원의 보험금을 받을 수 있다.

사업장에서는 집중호우로 건물 지하실이 완전 침수되며 보일러설비 등 기계설비 및 전기설비가 수침피해를 입었으며, 재산종합보험에서 가입금액 한도내에서 복구비용을 보상받았다.

라. 2011.7 태국홍수로 인한 기업휴지손해

2011년 7월부터 발생한 몬순성 폭우에 이어 세 차례의 태풍으로 태국은 50년 만에 최고의 강우량을 기록하며 수백 명의 사망자와 수많은 이재민이 발생하였다.

그리고 홍수로 인하여 주요 산업시설 여러 곳이 폐쇄되었고, 공장들은 몇 주간 물속에 잠겨 있었다.

홍수의 영향을 받은 산업 설비들은 주로 일본 기업의 태국 현지공장 및 일본 기업에 부품을 공급하는 공장들이며, 글로벌 자동차 제조사, 디지털과 전기제품 제조사에 핵심 부품을 공급할 수 없게 되었다.

현지 대규모 공장의 가동 중단과 감산으로 혼다와 도요타에 납품하는 국내 중소기업도 매출액이 절반으로 급감하였으며, 제품을 공급받지 못한 유통업체에도 간접적인 기업휴지손해가 발



생하였다.

일본기업의 공장 가동중단으로 인한 휴업손해를 담보하는 기업휴지보험의 재보험 인수로 국내 보험사도 약 1,500억 원의 손실을 입었다.

III. 보험업계의 위험관리

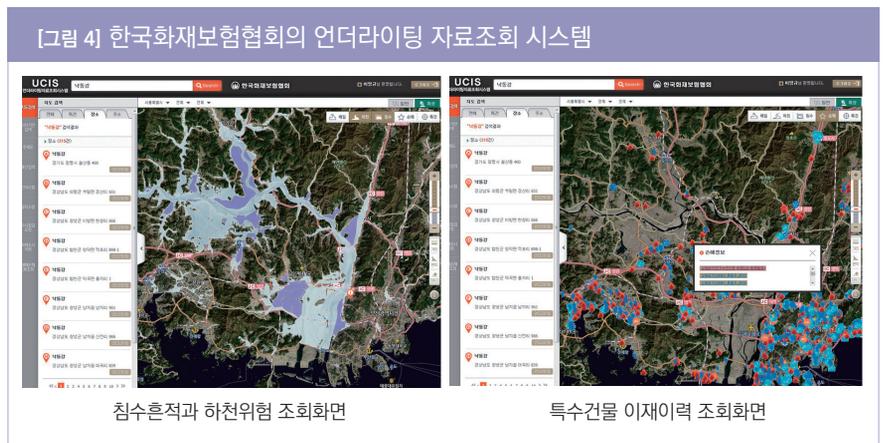
풍수재 등 자연재해로 인한 사고는 막대한 손실을 발생시킬 수 있으므로 위험관리가 중요하다. 보험사에서도 보험으로 전가되는 위험을 최소화하고 손해율을 낮추기 위해 인수물건의 위험관리에 많은 노력을 기울인다.

필자가 소속된 화재보험협회에서는 16층 이상 아파트 및 3,000㎡ 이상의 공장 등 일정 규모 이상 사업장에 대한 안전진단을 통해 사고예방 및 손해율 경감 기여에 노력하고 있다.

이전에는 화재가 주된 위험요인이었으나, 기후변화와 이상기후로 인하여 자연재해에 대한 위험관리 중요성이 부각되고 있다. 그에 따라 자연재해 위험요인별 재해지도 콘텐츠 및 풍수재위험도지수를 개발하여 보험사에 제공하고 있다.

협회에서 운영하는 UCIS(언더라이팅 자료조회 시스템, ucis.kfpa.or.kr)는 지리정보시스템(GIS)을 통하여 지도 기반 검색이 가능하며 안전점검 내용 및 7종의 재해지도(강풍, 하천범람, 폭풍해일, 침수흔적, 낙뢰, 적설, 태풍)를 제공하고 있으며, 대상 사업장에 잠재된 위험을 확인·평가하여 손해보험사의 언더라이팅) 활동을 지원한다.

올해도 벌써 이른 무더위가 시작되며 이상기후로 인한 재해가 우려된다. 집중호우, 태풍 등 자연재해로 인한 대형사고를 방지하기 위해 예방관리에 주의를 기울여야 할 시기이다. 사전



1 언더라이팅은 위험판단을 통한 인수여부의 결정, 인수조건 및 보험요율 산정, 보유금액 및 재보험방법 결정 등 보험계약 인수와 관련된 광범위한 보험사업의 핵심업무이다.

에 철저한 대비를 통해 피해를 줄이는 것이 우선이지만, 대형 자연재해는 불가피한 피해를 가져오므로 보험을 통해 손해를 보전할 수 있는 사후적인 대책도 중요하다.

자연재해는 불확실성이 높아 과거의 통계 및 최근 트렌드를 통한 예측이 필요하다. 기상청 자료는 자연재해를 예측하여 대응방안을 마련하고 재해다발지역의 위험을 정확하게 평가하여 손해보험을 운영하는데 많은 도움을 준다.

보험업계에서도 자연재해 손해를 경감시키기 위하여 지속적으로 사업장의 점검매뉴얼, 대책 수립 등 위험관리를 강화해야 할 것이다.

참고문헌

코리아리, 2019: The RISK, 76pp.

코리아리, 2017: The RISK, 46pp.

스위스리, 2011: 스위스재보험 태국홍수로 인한 보험손실액 추정, 2pp.

보험신보, 손보업계 기업성보험 위험관리 강화(2012.03.19.)

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 |
| 해외기술동향 | • 우주환경의 현황과 전망 | 안병호 | 82-92 |
| | • 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, 구삼욱 | 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 ₂) 저감기술 개발동향: DME 제조기술 | 조원준 | 78-84 |
| 논 단 | • 기후변화와 정보통신 산업의 상관관계: 그린 IT를 중심으로 | 양용석 | 85-99 |
| | • 기후변화 대응을 위한 산업계 및 소비자의 책임 | 김창섭 | 100-109 |
| 뉴스 포커스 | • 기후변화미래포럼 개최 후기 | 김정윤 | 110-115 |

기상기술정책지 발간 목록

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

| 칼 럼 | • 국가기후자료 관리의 중요성 | 켄 크로포드 | 1-2 |
|--------|-------------------------------|----------|---------|
| 정책초점 | • 기후변화통합영향평가에대한 국가기후정보의 역할 | 전성우 | 4-11 |
| | • 친환경 도시 관리를 위한 기후 정보 구축 방안 | 권영아 | 12-22 |
| | • 기상정보의 농업적 활용과 전망 | 심교문 | 23-32 |
| | • 기상자료 활용에 의한 산불위험예보 실시간 웹서비스 | 원명수 | 33-45 |
| | • 경기도의 기상·기후정보 활용 | 김동영 | 46-57 |
| | • 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 | 57-71 |
| | • 기상기후정보 효율성 제고를 위한 융복합 연구 | 이성종 | 72-77 |
| 포 커 스 | • 위험기상에 따른 기상기후 빅데이터 활용 | 국립기상연구소 정책연구과 | 78-93 |

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

| | | | |
|--------|--------------------------|----------------|--------|
| 칼 럼 | • 위성을 활용한 전 지구적 관측 방안 | 고윤화 | 3-4 |
| 정책초점 | • 기상위성 운영기술의 선진화 방안 | 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 | 68-81 |
| 해외기술동향 | • 기상위성 기술·정책 정보 동향 | 국가기상위성센터 위성기획과 | 82-92 |
| | • 위성기반 작전기상 소개 | 안숙희, 김백조 | 93-100 |

기상기술정책지 발간 목록

장마의 사회경제적 영향, 제8권 제1호(통권 제21호), 2015년 6월

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

겨울철 위험기상의 영향과 대응, 제8권 제2호(통권 제22호), 2015년 12월

| | | | |
|------|-----------------------|-----|-------|
| 칼 럼 | • 겨울철 위험기상 예보의 중요성 | 고윤화 | 3-4 |
| 정책초점 | • 겨울철 위험기상을 위한 에너지 정책 | 김두천 | 6-17 |
| | • 한국의 동절기 도로제설 현황 | 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 | 예상옥 | 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 |
| 논 단 | • 건강한 겨울나기, 겨울철 질환에 대한 예방 및 대응 | 임도선 | 60-68 |
| | • 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 소하천 계측기술 | 정태성 | 41-52 |
| 논 단 | • 돌발 기상 예보와 과제 | 이우진 | 53-65 |
| | • 중규모 대류계의 예측 | 이동규 | 66-79 |
| | • 위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단 | 손병주 | 80-90 |
| | • 중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언 | 이규원 | 91-105 |
| 포 커 스 | • 집중호우 등 풍수재 사고와 담보보험 | 이보영 | 106-112 |

『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

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

A decorative graphic consisting of several overlapping, wavy, translucent blue lines that flow across the middle of the page from left to right, creating a sense of movement and depth.

Volume 13, Number 1

33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea

TEL. 064-780-6545 | FAX. 064-738-6513

<http://www.kma.go.kr>