

# METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

기상  
기술  
정책

## 기상 기술 정책

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

2023.6

2023.

6

**특집** | **선진 기술동향 및 미국 기상예산 분석**

**칼럼** | 기상기술의 퀀텀점프를 가능케 할 양자컴퓨팅 기술 |

**정책초점** | 메커니즘 기반의 장마 이해 |

| 집중관측을 통한 한반도 중규모 강수과정 연구 |

| 양자컴퓨팅과 일기예보: 장마와 집중호우를 중심으로 |

| 수치해석기반 기상 및 기후 예측을 위한 양자컴퓨팅의 실현 가능성 연구 |

**포커스** | 미국 해양대기청(NOAA)의 예산구조 분석 |

**Volume 16, Number 1**

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

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

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

기  
상  
청



『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: 유희동

편집기획: 국립기상과학원(책임운영기관) 연구기획과

편집위원장: 강현석

편집위원: 강현석, 나득균, 장근일,

임운진, 하종철, 임하권

편집간사: 박혜숙, 이대근, 김인점

## 발행처

주소: (63568) 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

국립기상과학원(책임운영기관)

전화: 064-780-6545 팩스: 064-738-6513

E-mail: dglee7@korea.kr





# CONTENTS

특집: 선진 기술동향 및 미국 기상예산 분석

**칼럼 03** \_ 기상기술의 퀀텀점프를 가능케 할 양자컴퓨팅 기술 / 유희동

**정책초점 08** \_ 메커니즘 기반의 장마 이해 / 장은철

**20** \_ 집중관측을 통한 한반도 중규모 강수과정 연구 / 이규원

**36** \_ 양자컴퓨팅과 일기예보: 장마와 집중호우를 중심으로 / 방승현

**48** \_ 수치해석기반 기상 및 기후예측을 위한 양자컴퓨팅의 실현 가능성 연구 / 안도열

**포커스 59** \_ 미국 해양대기청(NOAA)의 예산구조 분석 / 김득갑



# 기상기술의 퀀텀점프를 가능케 할 양자컴퓨팅 기술



유희동  
기상청장

기상청은 2023년도 정책목표를 「위험기상과 기후위기로부터 안전한 국민, 든든한 국가」로 지정하였다. 이를 위해 올해 6월 15일부터 1시간 50mm (3시간 90mm)의 강한 호우가 예상될 때, 해당 지역에 긴급재난문자를 직접 발송하는 정책을 시행하고 있다. 그리고 7월 11일 오후 4시, 서울에서 첫 긴급재난문자가 발송되었다. 국민의 생명과 재산 피해 예방을 위한 준비 태세의 중요성은 아무리 강조해도 부족함이 없을 것이다.

장마로 대표되는 우리나라의 여름철 강수와 호우 현상은 다양한 대기 조건의 상호작용으로 인해 발생, 소멸하기 때문에, 강수량 예측 등에 기술적으로 한계가 있는 실정이다. 호우 예측 역량을 개선하기 위해 수치모델 개발개선과 함께 집중관측 테스트베드 구축을 통한 현상 이해 및 검증에 이르는 과정 전반의 기술력을 향상시킬 수 있는 정책적 지원에 대한 요구의 목소리가 나오고 있는 것은 고무적인 부분이다. 그리고 사회적 혹은 기상학적으로 서로 다르게 받아들여지고 있는 장마의 개념에 대한 이해도 제고를 위한 발생 메커니즘 구분 등의 시도는 국민이 기상현상을 더욱 잘 이해하게 하는 데 도움을 줄 것이다. 그러나 이러한 현상 규명 및 이해도 제고와 같은 노력들에는 필연적으로 대용량의 계산작업이 요구된다. 더구나 기상청으로서는 강수 현상뿐만 아니라 태풍, 폭염, 한파, 그리고 해양 및 우주기상에 이르기까지 관심을 기울여야 할 현상이 넘쳐나는 현실이다.

이에 재해성 기상현상의 피해를 효과적으로 줄일 수 있는 기술의 적극적인 도입은 선택이 아닌 필수가 되어 가고 있다.

미래사회를 대비함과 동시에 최근 기상기후과학 분야에서도 주목하고 있는 분야로 양자컴퓨팅 기술이 대두되고 있다. 과학기술정보통신부는 지난 6월 27일 「대한민국 양자과학기술 전략」 발표에서 2035년까지 민·관 합동으로 최소 3조 원의 자금 투입을 통해 1천 큐비트 양자컴퓨터 개발과 양자 과학기술 분야에서 최선도국의 85% 수준 달성 및 2,500명 이상의 핵심 인력 양성 계획을 밝혔다. 이는 양자 과학기술에 대한 우리나라의 국가 전략을 처음으로 천명한 것으로, '2035년 글로벌 양자경제 중심국가'를 향한 대한민국의 여정이 본격적인 첫발을 뗀 것으로 평가할 수 있다. 연산 능력이 슈퍼컴퓨터의 수십조 배 이상을 상회할 것으로 기대되는 양자컴퓨팅 기술이 개발될 근미래 환경에 빠르게 적응하기 위해 기상청은 선제적으로 준비해야만 한다.

수치모델의 정확도를 향상시키기 위해 모델의 격자를 줄어나갈수록 계산 부담은 기하급수적으로 증가하게 된다. 현재 예사<sup>1)</sup> 스케일의 슈퍼컴퓨터가 구축되고는 있지만, 기상기후·환경을 예측하기 위한 대기-해양-빙권 통합모델은 그 이상의 성능을 필요로 한다. 이 같은 상황에서 슈퍼컴퓨터의 한계를 뛰어넘을 신기술인 병렬 연산이 가능한 양자컴퓨터에 기상청이 주목하는 것은 당연할 것이다. 양자 컴퓨터는 정보를 0과 1의 비트 단위로 처리·저장하는 일반 컴퓨터와 달리, 0과 1의 상태를 동시에 갖는 큐비트 단위로 정보를 연산·저장한다. 정보의 중첩이 가능한 큐비트로 인해, 이론적으로 사용자가 지시하는 모든 연산을 한 번에 수행할 수 있다. 이러한 양자컴퓨팅 기술을 기상업무에 적용하기 위해서는 양자컴퓨팅 알고리즘 최적화, 알고리즘 개발 및 양자 퓨리에 변환 구현 등 양자컴퓨팅 기반의 전산유체역학 적용 가능성 평가, 기존 수치예보 시스템과의 통합 등이 필요하다.

수치모델의 해상도가 두 배로 증가하게 되면 CPU 중심의 슈퍼컴퓨터에서는 약 10배의 전산자원이 필요하다. 이에 따른 전력과 냉각장치 등 슈퍼컴퓨터를 운영하기

1) 엑사플롭스 = 초당 100경( $10^{18}$ ) 번의 부동 소수점 연산을 나타내는 단위

위한 부대 장비와 장치들도 그 규모가 크게 늘어날 수밖에 없다. 이에 따라 계속 상세화되고 개선되는 수치예보 모델을 지원하기 위한 전산자원과 부대시설의 증가는 가히 기하급수적으로 늘어나게 된다. 또한, 기상기후 수치예보모델의 자료 처리 특성상 GPU로의 전환이 쉽지 않기 때문에 전산자원을 보다 효율적으로 사용하기 위한 기상기후 수치예보모델의 GPU 컴퓨터로의 전환은 세계적으로 그 진전이 매우 더딘 실정이다. 이런 배경으로 우리 기상청은 슈퍼컴퓨터의 도입과 수치예보모델의 개발은 세계 선진 기상청에 비해 매우 늦은 후발 주자이지만, CPU, GPU, 슈퍼컴퓨팅 기술을 넘어 양자컴퓨팅 관련 기술을 가장 선도적으로 접목 시키고자 한다. 이를 통해 가장 가성비 높은 양자 슈퍼컴퓨터를 장착하고 곁맞는 수치예보모델을 구동할 계획을 갖고 있다. 이렇게 된다면 양자컴퓨팅 기술을 바탕으로 세계적으로 가장 효율적인 수치예보모델 시스템의 운용이 가능하리라 믿는다. 이러한 믿음이 현재 어느 선진국 기상청보다 빨리 우리 기상청이 양자컴퓨팅 기술에 특별한 관심을 갖는 중요한 이유다.

물론 기상업무에서 양자컴퓨팅 기술이 상용화에 이르기까지는 많은 기술적 진보가 선행되어야 할 것이다. 하지만 여러 유형의 특수 컴퓨팅 자원을 결합하여 실시간으로 병렬성을 구현할 수 있는 시스템을 구축하는 등 현재 수준에서 가능한 기초연구를 지속적으로 추진하고, 이와 더불어 다양한 분야 전문가들 간의 긴밀한 협업이 이어진다면, 우리나라가 다가오는 양자컴퓨팅 시대에 치열한 경쟁을 뚫고 세계를 선도해 나갈 때 기상청도 큰 역할을 할 수 있으리라 기대한다.



# 정책 초점

메커니즘 기반의 장마 이해

| 장은철

집중관측을 통한 한반도 중규모 강수과정 연구

| 이규원

양자컴퓨팅과 일기예보: 장마와 집중호우를 중심으로

| 방승현

수치해석기반 기상 및 기후예측을 위한 양자컴퓨팅의 실현 가능성 연구

| 안도열

# 메커니즘 기반의 장마 이해

장은철 공주대학교 교수 장마특이기상연구센터 echang@kongju.ac.kr

- I. 서론
- II. 장마철 정체전선 사례의 유형 분류
- III. 북태평양 고기압 가장자리의 정의
- IV. 맺음말

장마는 한반도 여름철에 강수가 집중되는 시기에 나타나며 사회, 경제적으로 큰 영향을 미치는 현상이다. 그렇기에 장마의 정의와 특성에 관한 관심이 높았으며 사회적 장마의 개념과 과학적 장마의 개념 차이에서 발생하는 오해와 불만이 많았다. 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해 강수가 내리는 현상학적인 측면에서 장마가 어떤 원인과 구조에서 발생하는 현상인지를 설명하는 메커니즘 기반의 이해가 필요하다. 장마는 하나의 구조를 가지는 현상이라기보다는 다양한 메커니즘으로 나타나는 현상들의 집합으로 보는 것이 타당해 보인다. 다양한 장마 강수 유형에서도 공통적으로 북태평양 고기압 가장자리가 중요한 구조라고 알려져 있다. 우리는 객관적이며 메커니즘을 설명할 수 있는 변수로서 늘림 변형장을 제안하였고, 이 개념이 장마에 적용 가능함을 보였다. 장마에 대한 과학적 이해가 높아지면 강수 예측성을 향상시키며 사회적·과학적 장마에 대한 관점 차이를 줄여 현재 나타나는 오해를 줄일 수 있을 것으로 기대한다. ■

“ 기상학적 장마는 대중에서 설명하는 장마와 다르다. ”

## 1. 서론

장마는 일반적으로 6월 말에서 7월 말 사이에 연속적으로 강수가 나타나는 현상을 일컫는다. 장마라는 용어는 1500년대 중반 이후부터 '오랜'을 뜻하는 한자어 '장(長)'과 물 또는 비를 의미하는 '마'의 합성어로 사용된 것으로 파악되며, 1700년대 후반에 '장마'로 표기된 기록이 있다. 1957년 한글학회에서는 장마를 잇대어 매우 많이 오는 비로, 1999년 표준국어대사전에서는 여름철에 여러 날 계속해서 비가 내리는 현상이나 날씨, 또는 그 비로 설명하고 있다. 이는 장마를 비가 연속하여 내리는 현상 측면에 집중하여 정의를 내리고 있음을 알 수 있다. 지속적인 강수 현상으로써의 장마는 특별한 기상 관측 장비가 없어도 눈으로 관측 가능한 비 현상이기 때문에 기상 전문가가 아닌 민간에서도 인지될 수 있었다. 반면 1992년 기상학 사전과 1995년과 2011년 「장마백서」에서는 정체전선인 장마전선의 영향을 받아 비가 오는 것을 기상학적 장마로 설명하고 있다. 기상학적 장마는 비가 내리는 원인으로 정체전선 구조가 존재할 때를 의미한다는 점에서 대중에서 설명하는 장마와 다르다는 점을 알 수 있다.

여름철의 장마는 휴가철과 밀접하게 연관되어 있기에 관광 산업, 지역 경제 등도 중요한 연관성을 가진다. 그만큼 장마의 시작과 종료에 대한 예측 요구도 높았기 때문에, 기상청에서는 장마의 시·종예보를 제공한 바 있다. 하지만 장마의 종료 선언 이후에 강수가 발생하면, 이를 대중은 장마 종료의 예측이 잘못되었다고 인지하는 반면, 기상청은 장마전선이 소멸하여 직접적인 영향을 주지 않았기에 장마에 해당하지 않는다고 판단하는 상황이 다수 발생하게 되었다. 이에 기상청은 장마 시·종예보를 생산하지 않고 여름철이 지난 이후에 사후 분석을 통해 장마 특성을 분석하고 제공하였지만, 여전히 언론과 대중은 기상청의 예보에서 '정체전선'과 같은 용어가 사용되면 '장마'로 인지하여 종종 오해가 발생하고 있다. 이에 '장마' 용어의 재정의 또는 개념적 재정립에 논의와 공감대 형성이 필요한 시점이다.

“ 장마는 하나의 현상이 아닌, 다양하고 복잡한 현상들의 집합 ”

기상학적 장마와 사회적 장마의 개념이 일치하지 않는 이유는 강수 발생 메커니즘인 정체전선을 고려하는지의 차이에 있다. 하지만, 정체전선의 연구는 주로 형성 원인과 구조보다는 형태와 지속성, 강수량 등의 예보에 관련된 측면에 대하여 수행되어왔다. 과거 연구를 통해 장마철 강수의 예측성은 상당히 개선되었지만, 한 단계 높은 개선을 위하여 기상청은 '19년부터 장마 특이기상연구센터를 지정하여 장마와 이 시기의 강수에 대한 발생 원인과 구조에 집중된 과학적인 연구를 수행하고 있다.

## II. 장마철 정체전선 사례의 유형 분류

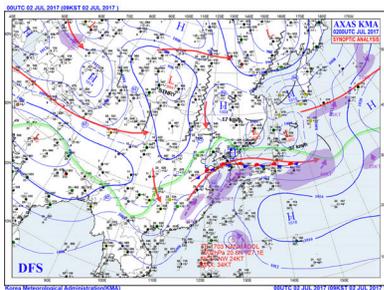
장마의 구조 연구를 위하여 정체전선이 형성된 것으로 파악된 사례들을 다시 수집하여 분류를 수행하였는데, 가장 먼저 확인할 수 있는 것은 일기도에서 나타난 기압 배치와 환경이 하나로 정리되지 않는다는 것이다. [그림1]은 과거 장마철 정체전선 사례를 종관 규모의 특징에 따라 분류하여 얻은 세 가지 유형의 대표 사례들이다. 이동성 고기압 유형은 장마 초기에 주로 나타나는 것으로 북태평양 고기압의 북서쪽 가장자리로 이동하는 종관 또는 중규모 고기압과 북태평양 고기압 사이에 형성된 경계면에서 동서로 이어진 구름 및 강수 밴드가 형성된다. 종관 저기압 형태 중 하층제트 유형은 북태평양 고기압 가장자리에 종관 규모의 저기압이 이동해 오면서 두 기압계 사이에서 합류로 인한 경계면이 형성되어 전선을 만드는 구조이다. 종관 저기압의 직접 영향을 받는 경우도 존재하는데, 종관 저기압이 북태평양 고기압 가장자리를 따라 이동하면서 저기압에 동반된 전선과 저기압 자체에 의한 강수 시스템이 비를 내리는 구조를 보인다. 각각의 유형별 구조는 개별적 특징을 보이지만 동시에 강수를 발생시키는 경계면 구조가 북태평양 고기압 가장자리라는 공통점을 동시에 가지는 점도 특징이라고 할 수 있다.

이 분류를 통해 얻을 수 있는 중요한 개념은 '장마는 하나의 현상이 아닌, 다양하고 복잡한 현상들의 집합'이라는 점이다. 하지만 사회적으로는 발생 구조를 고려하

[그림 1] 한반도 장마철 정체전선 발생 유형 구분에 따른 대표적 사례들의 일기도와 위성영상

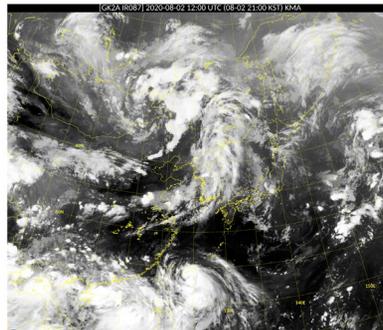
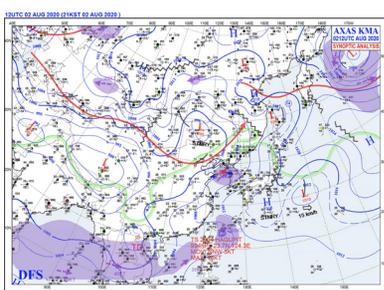
이동성 고기압

2017. 07. 02. 12 UTC



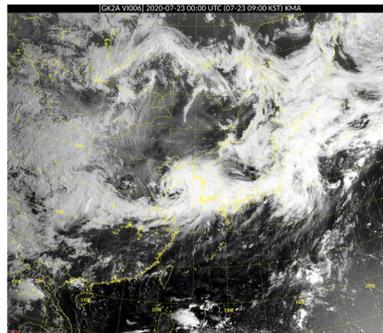
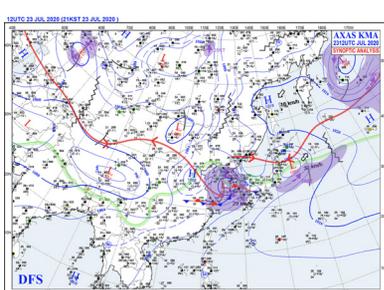
중관 저기압(하층세트)

2020. 08. 03. 06 UTC



중관 저기압

2020. 07. 23. 06 UTC



지 않고 비가 연속적으로 내리는 현상을 장마로 인지하기 때문에, 장마를 하나의 현상으로 바라본다. 기상학적 장마 역시 발생 구조로 '장마전선'을 고려하기는 하지만 장마전선으로 표현되는 정체전선을 메커니즘에 따라 구분하고자 하는 시도는 없었기 때문에 장마를 하나의 현상으로 인지하고 있었다고 볼 수 있다. 장마가 북

“ 강수 메커니즘  
측면에서 장마를  
이해한다면 사회적  
소통 강화에  
도움이 될 것 ”

잡한 메커니즘에 따른 다양한 현상 집합이라는 개념을 도입하는 것은 장마를 이해하려는 시각이 완전히 달라짐을 의미한다. 장마를 하나의 현상 또는 하나의 메커니즘으로 인지하여 모든 것을 설명하고 해결하려는 과거의 시도에서 벗어나 한반도의 강수 발생 메커니즘이라는 테두리 안에서 장마의 다양한 구조를 파악하고, 이중 장마철에 북태평양 고기압의 영향을 받아 주로 나타나는 구조들의 집합으로 장마를 정의할 수 있게 된다. 이 시각의 전환은 그동안 기상 전문가 집단과 사회적 대중 집단 사이에 존재하던 장마에 대한 오해 상황을 해결하는 근본적인 방안이 될 수 있다. 비가 내리는 지금이 장마기간인지 아닌지, 전인지, 종료 이후인지의 논의는 장마를 하나의 현상으로 인지할 때 발생하는 문제이기 때문에 더는 장마의 판단과 시종이 중요하지 않고 현재 또는 예상되는 강수의 메커니즘에 집중하게 될 것이다.

[그림 2]는 장마철 강수 유형별 메커니즘에 대한 개념 모델을 제시한 것이다. 이동성 고기압 유형은 북태평양 고기압 사이의 경계면에서 서로 반대의 흐름이 마주치는 영역이 발생하는데 상대적으로 북태평양 고기압의 규모가 압도적으로 크기 때문에 이동성 고기압의 가장자리 흐름이 중규모 이하의 크기 흐름으로 북태평양 고기압 쪽으로 말려들어가는 형태를 보인다. 이 경계에서는 북쪽의 차가운 공기와 남쪽의 습하고 더운 공기가 만나면서 수분과 온도 차이에 따른 전선면에서 상승이 발생하여 구름 및 강수 밴드가 형성된다.

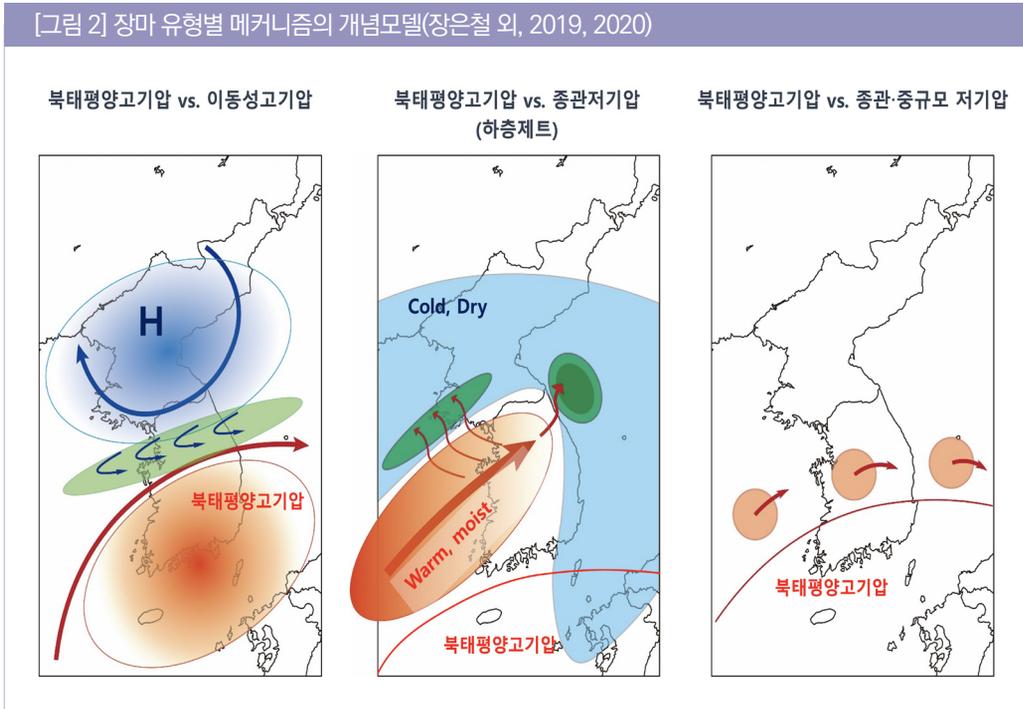
하층제트 유형은 북쪽의 저기압이 이동시키는 건조하고 차가운 기단이 북태평양 고기압이 수송하는 습하고 더운 공기와 합류하면서 구름과 강수의 밴드를 형성한다. 형성된 경계면에서는 두 종류의 상승 기류가 주로 나타나는데, (1)합류하는 흐름 방향(주로 동서방향)에서 남쪽의 기단이 북쪽의 기단 위로 넘어가는 성분이 만들어내는 상승, (2)합류하여 진행되는 흐름의 전면에서 차가운 기단을 만나 상승기류를 만드는 구조로 나타난다.

종관 저기압(또는 중규모 저기압 유형)은 서쪽에서 유입되는 저기압이 한반도로 유입되면서 북태평양 고기압 가장자리를 만나면서 경계면을 따라 이동하는 구조를 보인다. 한반도로 유입되는 저기압은 다양한 발원지에서 생성되어 이동해 오게 되

“ 장마 영향권에서 강수와 폭염이 반복적으로 나타나는 현상은 중규모 저기압의 연속 이동에 의해 나타난다. ”

는데, 이동 경로 역시 다양하게 나타난다. 이때, 고기압 가장자리에서 고기압 내부로 관통하여 이동하는 것은 어렵기 때문에 경계를 따라 이동한다. 종관 규모의 저기압은 한랭전선과 온난전선을 동반하여 이동하는 경우가 많고, 이런 저기압은 연속적으로 지나는 경우가 많아 현상 측면에서는 연속적인 강수가 발생하는 경우를 주로 보게 된다. 연속된 중규모 저기압이 한반도를 지나는 경우는 전선을 동반하는 경우가 많지 않고, 상대적으로 강수 강도가 강한 특징을 보인다. 이는 연속적으로 지나는 저기압 후면에서 국지적으로 중규모의 고기압을 형성하는 특징과 연계

[그림 2] 장마 유형별 메커니즘의 개념모델(장은철 외, 2019, 2020)



되는데, 이 경우는 중규모 저기압에 의한 강수가 종료되면 바로 고기압 영향으로 일사가 증가하여 폭염의 영향을 받을 수 있다. 장마의 영향권에서 강수와 폭염이 반복적으로 나타나는 현상이 주로 이런 중규모 저기압의 연속 이동 형태에서 나타난다.

“ 고기압 가장자리  
설명에 폭넓게  
활용되어 온  
변수는  
500hPa  
지위고도 ”

### III. 북태평양 고기압 가장자리의 정의

앞서 언급된 장마 유형은 모두 북태평양 고기압 가장자리에서 형성되는 경계면이 구름 및 강수를 발생시키는 직접적인 원인이라는 공통점을 가진다. 기상청 예보관들과 학계에서도 북태평양 고기압의 가장자리가 강수 밴드의 위치를 설명할 수 있다는 점에 착안하여 고기압 가장자리를 설명할 수 있는 변수를 찾는데 집중해 왔다. 가장 오랫동안 폭넓게 활용되어 온 변수는 500hPa 지위고도이다. 북태평양 고기압은 연직으로 높게 성장한 큰 규모를 보이는데 500hPa의 기압 패턴은 지상에서부터 연결된 기압 패턴으로 볼 수 있다. 500hPa 지위고도는 북태평양 고기압의 확장/경계 이동을 명쾌하게 보여줄 수 있다는 점에서 5880gpm이 북태평양 고기압의 가장자리를 표현한다고 알려져 있었으며, 기후 분야에서는 이 기준을 이용하여 북태평양 고기압의 확장/이동/형태를 분석하였다. 하지만 날씨 규모의 분석 또는 예측에서는 이 기준을 사용하기에 다소 모호한 점이 존재하는데, [그림 3]에 나타난 것과 같이 5880gpm이 구름과 강수의 위치와 언제나 일치하지는 않는다는 것이다. 예보관들은 이런 불일치가 존재하더라도 오랜 경험에 근거하여 자연스럽게 해당 시점에서의 지위고도와 강수 위치 보정을 통해 강수 밴드의 이동을 예상할 수 있었다. 이는 500hPa의 5880gpm이 정확한 강수 위치를 보장하지는 못하여도 강수를 형성하는 경계면의 이동 경향과 형태는 제시할 수 있기 때문이다. [그림 3]의 붉은 실선으로 표현된 것과 같이 예보관들은 실제 강수대의 위치는 5880gpm과 5820gpm 사이에 주로 나타날 수 있다는 점을 파악하여 적용하고 있다.

지위 고도의 특정 값을 이용하여 북태평양 고기압의 가장자리를 정의하는 방법은 경험적으로 유용함이 검증되었으며, 간편하다는 장점이 있다. 하지만 강수의 메커니즘에 중심을 두고 장마철 강수 유형들의 특징을 제시하고자 하는 접근방법에서는 “왜 특정 지위고도가 고기압 가장자리를 의미하는가? 특정 지위고도의 값이 물리적으로 고기압 가장자리를 설명하는 이유가 있는가?”라는 근본적인 질문을 만나면 “글쎄?”, “아니다”에 가까운 답을 내놓게 될 것이다. 지위고도는 기압과 동일한 의미를 가지는 물리변수로서 특정 값이 그 구조를 직접적으로 표현하기는 어

“역학적으로 바람의 합류를 설명할 수 있는 개념 중 하나는 '변형'”

려워 북태평양 고기압의 가장자리 구조를 물리적으로 설명할 수 없다는 결론에 이르게 된다.

700hPa 상당온위 경도는 고기압 가장자리의 구조를 표현하기 위하여 장마백서(2011)에서 사용되었다. 고온 다습한 북태평양 고기압 기단과 상대적으로 차고 건조한 기단이 만나 형성하는 경계면이 정체전선을 형성한다는 점에서 물리적 개념을 이용한 접근방법이라 할 수 있다. 하지만 [그림 3]에서 나타난 것과 같이 강수대가 강하게 발달하기 전 단계인 명확하게 강수밴드가 이어진 형태가 나타나지 않은 시점(2017년 7월 2일 00 UTC)에서는 북태평양 고기압의 경계를 설명하는 것보다 수증기 분포에 민감하게 반응하는 특징을 보인다. 하지만, 대기 중 수증기는 대표적인 불연속 변수로서 강수 구조를 설명하는데 필수적인 변수인 것은 틀림없으나, 종관 규모 이상의 구조를 매끄럽게 표현하기에 다소 무리가 있는 것으로 판단된다.

앞서 제시된 장마 강수 유형별 개념모델에서 공통적으로 표현된 북태평양 고기압 가장자리의 특징은 강수대를 형성하는 경계면이 바람 합류의 구조와 일치하여 나타나는 점이다. 역학적으로 바람의 합류를 설명할 수 있는 개념 중 하나는 변형(deformation)이다. 변형은 식(1)과 같이 표현된다.

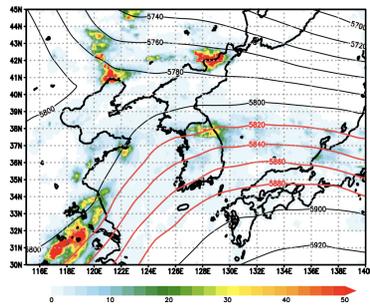
$$\sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

이때  $\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)$ 는 시어 변형장(shear deformation),  $\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)$ 는 늘림 변형장(stretching deformation)을 각각 설명한다. 동서로 길게 늘어져 나타나는 합류 구조는 늘림 변형장의 형태로 설명이 가능하며, 늘림 변형장이 강한 지역은 늘림 축의 방향으로 서로 마주치는 흐름이 서로 성질이 다른 기단을 만나게 하면서 전선 발생의 구조를 나타낼 수 있어 고기압 가장자리에서 형성되는 정체전선의 물리적 의미를 포함한다. 동일한 사례에 적용한 결과를 [그림 3]에 나타내었는데, 700hPa의 늘림 변형장은 500hPa 지위고도가 가지는 고기압의 형태를 잘 표현하고 있으며 동시에 강수대가 강하게 형성되는 시점과 이전 시점 모두 강수대를 잘 표현한다는 특징을 보인다.

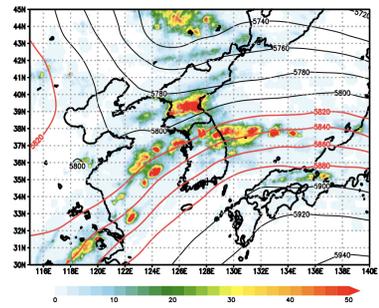
[그림 3] 북태평양 고기압 가장자리를 나타낼 수 있는 변수들(음영은 6시간 누적된 IMERG 강수(mm), 실선으로 표현된 변수들은 위에서부터 차례로 500 hPa 지위고도, 700 hPa 상당온위 경도, 700 hPa 변형장을 의미. 500 hPa 지위고도 실선 중 붉은색은 예보관들이 북태평양 고기압 가장자리로 주로 참고하는 5820-5880 gpm을 표시한 것임. 이 변수들은 ERA5 자료를 이용하여 산출됨)(장은철 등, 2020)

**500 hPa 지위 고도 (gpm, 검은 실선)**

2017. 07. 02. 00 UTC

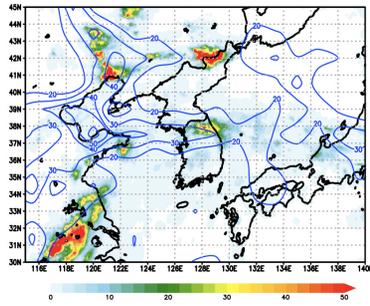


2017. 07. 02. 12 UTC

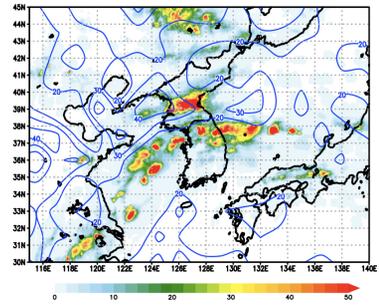


**700 hPa 상당온위 경도 ( $10^{-6} s^{-1}$ , 푸른 실선)**

2017. 07. 02. 00 UTC

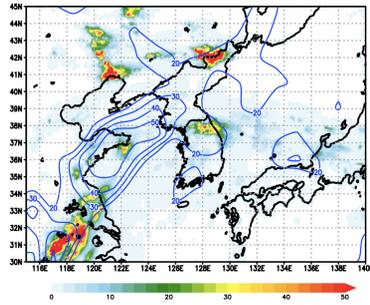


2017. 07. 02. 12 UTC

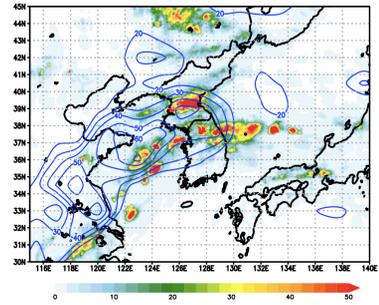


**700 hPa 변형장 ( $10^{-6} s^{-1}$ , 푸른 실선)**

2017. 07. 02. 00 UTC



2017. 07. 02. 12 UTC



“ 늘림 변형장으로  
과거 장마 분석하면  
기후변화 관련  
과학적 제안 가능 ”

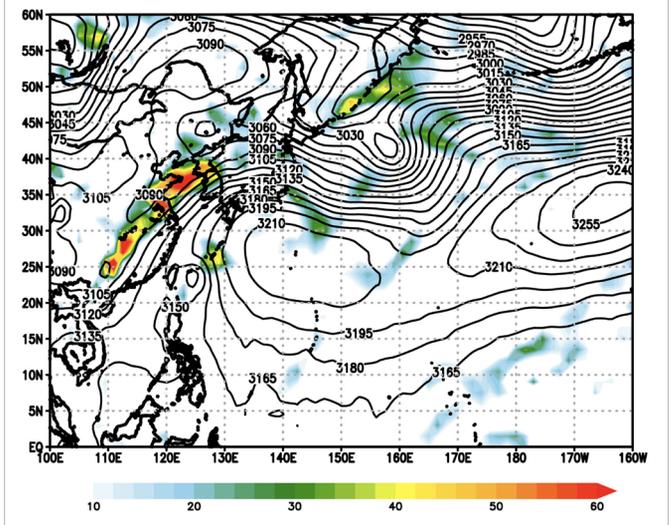
[그림 4]는 늘림 변형장을 활용한 북태평양 고기압 가장자리의 물리적 의미를 파악하고자 분석 영역을 북태평양 고기압의 전체 형태가 나타날 수 있는 범위로 넓혀 표현한 것이다. 북서태평양 지역에 중심을 두고 형성되어 있는 3210gpm 폐곡 구조가 우리가 인지하는 북태평양 고기압(태평양 전체 영역의 관점에서는 북서태평양 아열대 고기압(Western North Pacific Subtropical High)으로 표현하기도 함)을 나타내고 있다. 이 구조에서 늘림 변형장은 북태평양 고기압의 전체 가장자리를 의미하지 않으며, 실제 경계면이 형성되어 강수를 발생시킬 수 있는 북태평양 고기압의 북서쪽 경계에서 명확하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

[그림 3]에서 보인 같은 시간의 강수 밴드와 비교해보면 [그림 4]의 늘림 변형장은 강수 구역의 의미보다는 집중호우를 발생시킬 수 있는 환경을 의미하는 것으로 볼 수 있다. 이를 이용하면 몇 가지 의미 있는 논의를 끌어낼 수 있다.

우선 변형장의 형성과 이동을 통해 정체전선의 변화를 추적할 수 있는데, 정체전선이 영향을 미치고 있는 상황을 변형장의 존재로 파악할 수 있다면 과거부터 현재까지의 장마 형태 변화를 객관적 기준으로 재분석 할 수 있다는 점이다. 현재까지 발표된 장마의 시작과 종료는 사회적인 인지와 당시 예보관의 주관이 포함될 가능성이 있으므로 객관성이 충분하지 않다는 한계를 가진다. 늘림 변형장을 이용하여 과거의 장마 환경을 객관적으로 재구성하고 시작, 종료를 이 기준으로 다시 분석한다면 기후 변화의 측면에서 장마의 시작과 종료가 당겨지고 있는지, 늦춰지고 있는지, 장마의 기간은 늘어나거나 줄어들고 있는지를 과학적으로 제안할 수 있을 것이다.

다른 논의점은 늘림 변형장이 설명하는 장마철 정체전선의 환경과 실제 강수를 발생시키는 구조에 관한 것이다. 장마철에 연속하여 비가 내린다고는 하지만 장마

[그림 4] 2017년 7월 2일 12 UTC의 700hPa 지위고도(검은실선, gpm)와 늘림 변형장( $10^{-6} s^{-1}$ , 음영)



정체전선

“ 장마 종료는  
북태평양  
고기압  
가장자리  
경계면의  
소멸 순간 ”

기간에 해당하는 전체기간 동안 강수가 멈추지 않고 연속적으로 발생하지는 않는다. 하지만 이 강수가 수 시간 또는 수일 동안 멈추는 기간에도 구름 밴드가 지속적으로 유지되고 있거나 수증기 수송이 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 장마철 정체 전선 상에서 강수가 발생하는 것은 전선보다 작은 규모의 메커니즘이 직접적으로 관여하는 것을 의미하며, 역학적으로 상승 운동이 이 메커니즘을 설명한다고 볼 수 있다. 즉, 장마철 강수가 발생하기 위하여 북태평양 고기압 가장자리에서 발생하는 대규모의 합류 구조(변형장으로 설명)와 강한 수분 수송(변형장과 연관), 그리고 상승 운동이 모두 필요한 것이다. 그렇다면 이 요인 중 상승 운동이 약화되어 강수 현상이 중지되고 나머지 요인은 유지된다면 장마가 종료된 것으로 이해해야 하는 것일까? 사회적, 과학적 논의가 필요한 부분이지만 변형장으로 표현되는 북태평양 고기압 가장자리의 정체전선 구조가 유지되고 있다면 상승이 발생하면 언제든 다시 강수가 시작될 수 있다는 점에서 장마의 종료는 북태평양 고기압 가장자리 경계면이 소멸되는 순간으로 판단하는 것이 적절할 것으로 제안한다. 이와 연계된 중요한 사실 하나는 북태평양 고기압 가장자리의 경계면은 여름철의 한반도에서 한 번만 발생하는 것이 아니라는 점이다. 과거 상황에 대한 분석을 수행해 보면 변형장은 소멸한 뒤에도 다시 형성될 수 있으며, 남쪽에서 확장하는 고기압 가장자리가 두 개 이상의 경계면을 형성하여 한반도가 차례로 경계면의 영향을 받는 경우가 있다. 이렇게 두 번 이상의 밴드형 강수 영향을 받으면 기상·기후 이변으로 설명하려는 경우들이 종종 있었는데, 이런 반복된 밴드형 강수의 영향은 한반도 장마철에서 특징적으로 나타났었던 일반적 성향으로 보는 것이 합당하다. 이러한 오해의 원인을 추측해 보면 과거 교과서에서 북태평양 고기압이 확장하면서 장마전선이 제주지역에 영향을 미치면 장마가 시작되고, 한반도를 북쪽으로 벗어나면 장마가 종료된다는 설명이 있었는데, 이 이해를 바탕으로 고기압이 북상하는 과정에서 장마는 단 한 번 발생한다는 고정관념으로 발전하였다고 생각된다. 변형장을 이용한 객관적 과거 장마의 재분석을 통해 이러한 부분이 명확하게 제시되면 상당 부분의 오해가 해소될 것으로 기대된다.

## IV. 맺음말

장마는 과거 오랫동안 사람들에게 인지되어온 현상이다. 장마라는 용어 역시 과학적 분석과 이해가 시도되기 훨씬 이전부터 사용되어온 것이다. 현재 ‘장마’는 기상청과 학계에서 설명하는 정체전선과 언론 및 대중에서 언급하는 연속적인 강수 현상이 혼재되어 사용되기도 하며, 이 과정에서 대중은 기상학적 장마를 언급하는 기상청과 학계에 대한 불만을 표현하는 경우가 발생하고 있다. 이를 해결하기 위하여 장마를 대체할 수 있는 새로운 용어를 찾고 사회적 합의를 이루려는 노력이 시작되고 있다. 개인적인 의견이지만 ‘장마’는 과학자들이 사용하기 이전부터 우리 생활과 문화에 자리 잡은 용어인 만큼 이를 직접 변경하거나 대체하는 것은 바른 방향이라고 생각하지 않는다. 장마는 과거에서 사용되었던 것처럼 현상학적인 측면에서 연속적인 강수 현상을 뜻하는 단어로 학계에서 민간으로 되돌려주고, 학계에서는 메커니즘에 근간을 둔 새로운 용어를 사용하고 홍보하는 방향을 제안한다. 이를 위해 장마를 메커니즘 측면에서 상세히 분석해야 하며 객관적으로 판단할 수 있어야 한다. 장마의 구조와 메커니즘에 관한 본격적인 연구는 이제 막 시작되었다. 이러한 연구들이 꾸준히 진행될 수 있도록 연구 환경이 지원된다면 장마의 과학적 이해를 높여 강수 예측성을 향상시킬 수 있고, 이를 통해 기상재해로부터 사회경제적 피해를 줄일 수 있을 것이다. 그리고 과학계와 사회적 인식 간의 오해를 줄여 연구 결과가 일상생활에 적용되는 선순환 구조를 만들 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- 장은철, 손석우, 김주완, 이규원 등. 2019: 장마철 집중호우 특성 분석 및 예측성 향상 기술개발 연구 용역 최종보고서, 기상청 국립기상과학원.
- 장은철, 손석우, 김주완, 이규원 등. 2020: 장마철 집중호우 특성 분석 및 예측성 향상 기술개발 연구 용역 최종보고서, 기상청 국립기상과학원.

“ ‘장마’는 민간이  
사용하게 하고,  
학계는 새로운  
용어를 선정하는  
것을 제안함 ”

# 집중관측을 통한 한반도 중규모 강수과정 연구

이규원 경북대학교 대기과학과 교수 장마특이 기상연구센터 gyuwon@knu.ac.kr

- I. 집중관측의 필요성
- II. 집중관측 및 현업화
- III. 집중관측 중요 기상요소
- IV. 한반도의 강수 특성
- V. 집중관측 강수 연구 방안

한반도 여름철 강수는 수증기가 많은 조건에서 구름 꼭대기가 낮은 온난우가 빈번하게 발생하는 특성을 보인다. 또한 호우는 다양한 규모의 상호작용으로 발생하며 중규모 특성을 보여 예측성이 낮다. 이의 예측성 향상을 위해서는 역학 및 열역학 구조, 물리 특성 및 과정 등에 관한 이해가 필요하며 이를 바탕으로 수치모델을 개발 및 개선하고 호우 생성과 밀접한 기상변수에 대한 수치모델 초기조건의 품질을 다양한 규모에서 향상시켜야 한다. 이를 위해서는 다양한 기상변수에 대한 체계적인 집중관측을 통하여 관측-현상이해-모델-예측-검증의 밸류체인을 완성하여 새로운 관측 및 모델링기술들이 연구에서 현업으로 전환될 수 있어야 한다. 집중관측 테스트베드에서는 현업에서 활용하지 못하는 첨단관측장비인 도플러라이더, 차등감쇠라이더, 구름레이더 등을 활용하여 대기경계층에서 바람, 온도, 수증기에 대한 관측을 강화하고, 구름/강수의 발생-발달-소멸의 모든 단계에서 상세한 역학, 열역학 및 강수 물리 특성을 파악할 수 있어야 한다. ■

## 1. 집중관측의 필요성

“ 호우의 정확한  
예측 위해 종관,  
중규모, 미세규모  
관측이 중요 ”

한반도에서 발생하는 호우는 여름철 장마와 연계되거나 따뜻한 계절에 주로 발생하는 중규모 대류계(Mesoscale Convective Systems, MCS)와 연관된다. 이들은 강수 발달을 유도하는 종관규모 환경, 중규모 이하의 대기 특성, 또는 규모간 상호 작용에 의하여 발생한다(Laing and Fritsch 1997, 2000). 종관규모의 대기 특성은 강수 생성 및 발달에 대한 초기 원인을 제공하지만, 중규모 환경 특성에 따라 다양한 강도의 강수현상으로 발달할 수 있다. 또한 종관규모의 대기 환경에 관계없이 순수하게 중규모 이하의 열적, 역학적 요인으로 호우가 발달할 수 있다. 특히 한반도에서는 많은 국지호우 사례(시간당 강수량 30mm 이상)가 존재하며, 국지호우가 발생하는 지역과 형태(중부, 남부, 고립형 등)에 따라 다양한 특성이 나타난다(Jo et al., 2020). 따라서 한반도에서 발달하는 호우의 발생 메커니즘을 이해하기 위해서는 수 km에서 수천 km까지 다중규모에 대한 상세 관측 및 분석이 필요하다. 즉, 호우의 정확한 예측을 위해서는 종관뿐만 아니라, 중규모 및 미세규모에서 관측이 매우 중요하다.

최근 현업 수치예보모델의 체계적인 평가에 따르면, 종관 현상에 대한 분석 및 예측은 비교적 높은 정확도를 가지지만, 규모가 작아지면서 정확도와 예측 가능성은 현저히 낮아진다. 즉, 저기압의 발달 및 위치는 비교적 정확히 예보하지만, 저기압내 호우 발생 지역 및 시간에 대한 예보 정확도는 낮다. 이러한 현업 수치예보모델의 경향은 우리나라뿐만 아니라, 전 세계가 공통으로 경험하고 있다. 특히 여름철에 발생하는 대류성 강수의 경우, 대기 하층의 수증기 및 온도에 대한 편차와 대류를 유발하는 발생인자를 적절하게 예측하지 못하여 호우에 대한 정확한 예측이 어렵다. 따라서 대기경계층에 대한 상세한 집중관측과 종관규모가 아닌 중규모 및 미세규모에서 대류를 유발할 수 있는 발생인자에 대한 관측이 필요하다.

강수과정은 물의 상변화에 따른 잠열(latent heat)의 방출 및 흡수를 동반한다. 여름철 호우를 동반하는 중규모 강수의 경우, 그 지속시간이 길고 넓은 영역에서도 발생할 수 있다. 이러한 강수는 잠열 방출에 의한 열적 피드백이 강수의 강화와

“ 목적지향형 관측, 강수과정 메커니즘 규명, 수치모델 개선, 상세관측망 활용 예측성 향상 ”

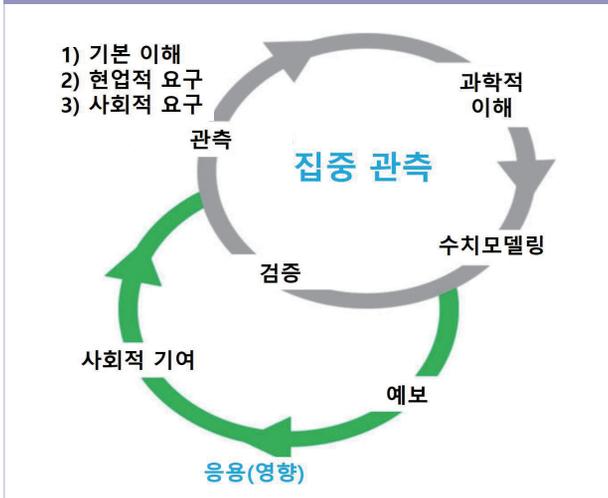
지속에 매우 중요하다(Houze et al. 1990; Houze, 2004). 또한 고도에 따른 가열 프로파일(heating profile)은 강수유형(층운형, 적운형 등)에 따라 큰 차이가 있다. 따라서 강수에 대한 정량적 예측을 위해서는 강수과정에 대한 상세한 관측, 강수 과정의 규명, 강수 유형별 가열 프로파일 및 이에 의한 역학적·열적 피드백 과정을 이해하고 이를 수치예보모델에 반영해야 한다. 즉 강수 예측 정확도 향상을 위해서는 강수의 연직구조, 강수입자 및 유형, 강수시스템과 연관된 상세 바람구조 등에 대한 관측이 필요하다.

결론적으로 여름철 호우의 예측성 향상을 위해서는 중규모 및 미세규모 관측이 가능한 테스트베드 및 슈퍼사이트를 구축하고 이를 이용한 목적지향형 관측이 요구된다.

## II. 집중관측 및 현업화

다양한 사회적·현업적 요구를 충족하고, 기본 강수과정에 대한 이해를 제고하기 위해서는 테스트베드를 구축하고, 이를 이용한 체계적 집중관측이 선행되어야 한

[그림 1] 집중관측을 통한 과학적 이해와 사회적 기여에 대한 모식도(Stith et al., 2018)



다[그림 1]. 집중관측에서 획득한 다양한 자료들을 활용하여 강수과정을 이해하고 모델링 기술을 개선하여 기상변수 및 강수 예측에 대한 정확도를 향상해야 한다. 모델링 결과를 활용하여 다양한 형태의 예측 결과를 생산하고, 이를 활용함으로써 사회에 기여할 수 있으며, 이러한 기여는 새로운 관측기술에 대한 요구로 이어진다.

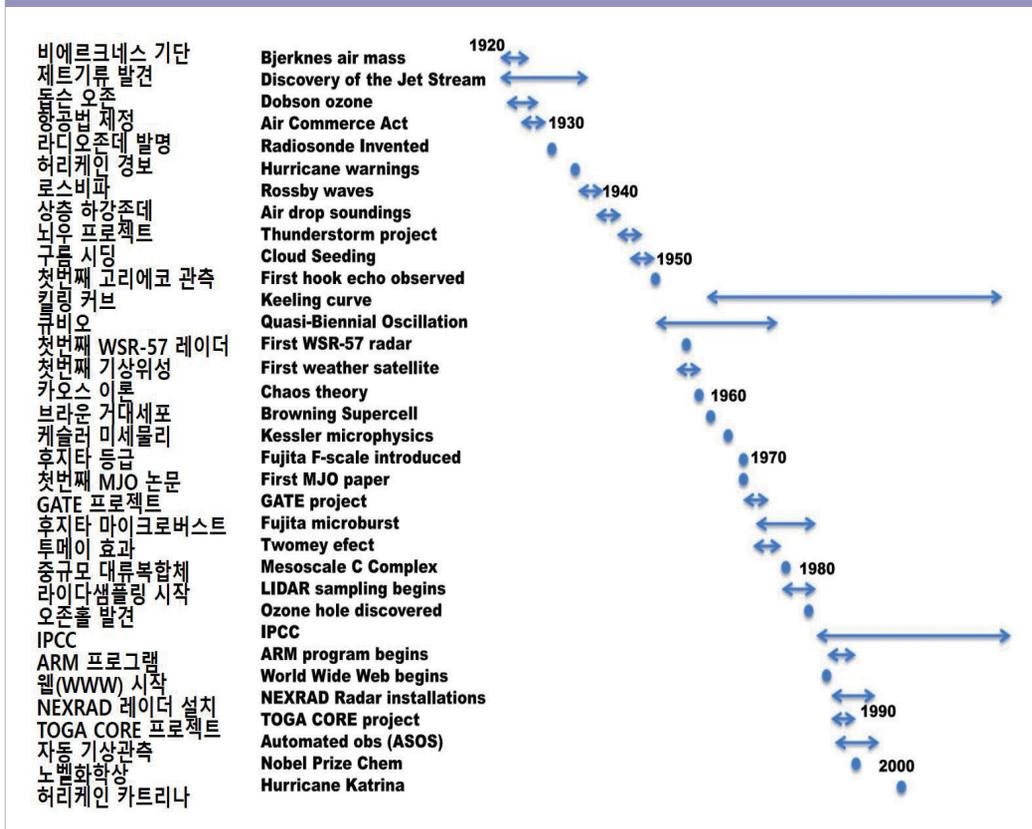
한편, 모델링 결과는 다양한 방법을 통해 검증 및 평가되어, 관측 기술을 새롭게 개선하거나 보강된 집중관측을 통해 보다 다양한 강수과정에 대한 이해도를 향상시킬 수 있도록 피드백되어야 한다. 이러한

“ 관측-현상이해-모델링-검증의 순환구조는 집중 관측으로 개선 및 완성이 가능 ”

관측-현상이해-모델링-검증의 순환구조는 집중관측을 통하여 개선 및 완성될 수 있다.

[그림 2]는 20세기 대기과학 발전의 마일스톤(milestone)이다. 이들 중 검은색 밑줄은 현상 및 과정에 대한 이해, 붉은색은 관측기술, 그리고 초록색은 집중관측을 의미한다. 비아크네스의 기단, 제트의 발견, 거대세포 등은 중요한 기상현상에

[그림 2] 20세기 대기과학 발전의 마일스톤(Stith et al., 2018)



대한 이해에 해당하며, 라디오존데 개발, 하강존데 개발, 기상레이더 및 기상위성 개발 등은 새로운 관측기술이다. 현상이해와 새로운 관측기술 개발의 중심에는 반드시 집중관측을 기반으로 하는 특정 현상에 대한 연구가 함께 진행되었다. 뇌우 프로젝트, GATE(Global Atmospheric Research Program's Atlantic Tropical

“ 집중관측 테스트 베드는 현업과 연구의 가교 역할을 수행 ”

Experiment) 프로젝트, ARM(Atmospheric Radiation Measurement) 프로그램 등은 테스트베드를 활용한 대규모 집중관측 프로그램들이다. 새로운 집중관측 프로그램을 통하여 지금까지 이해되지 못한 현상들이 연구되고 새로운 관측장비들이 시험 및 평가되었다.

집중관측을 위한 테스트베드는 현업과 연구의 간격을 연결할 수 있는 가교 역할을 수행한다(Dabberdt et al., 2005)[그림 3]. 연구개발은 새로운 가설 또는 이론을 시험하는 반면, 현업은 안정적 운영을 요구한다. 연구개발에서는 고해상도가 우선

[그림 3] 연구개발 및 현업의 차이와 이를 연결하는 테스트베드 모식도

연구개발	테스트베드 간격을 줄이는 기반 요소	현업
1. 실험, 탐구		1. 신뢰성
2. 고해상도		2. 효율성
3. 다중센서		3. 비용 대비 효율성
4. 새로운 기상변수		4. 상용화, 규격화
5. 물리과정의 진단		5. 지속성

하지만, 현업에서는 효율을 고민하여야 한다. 연구개발을 위해서는 다양한 장비들을 사용할 수 있지만, 현업에서는 비용 대비 효율성을 고려해야 한다. 연구개발은 새로운 기상변수나 새로운 장비를 지속적으로 적용 및 활용하며, 물리과정에 대한 진단을 목표로 하지만, 현업에서는 새롭게 개발된 장비를 사용하지 못한다. 현업에서는 새롭게 개발된 장비를 사용하

기보다는 안정성이 검증된 상용 장비를 사용하며, 지속성이 담보되어야 한다. 이처럼 연구개발과 현업 사이에는 큰 간격이 존재하는데, 집중관측 테스트베드를 통해 지속적으로 이러한 간격을 줄여나갈 수 있다. 이 때, 집중관측 테스트베드는 새로운 개념이나 아이디어를 시험할 수 있도록 유연성이 있고, 다양한 효율성을 판단할 수 있는 전문성이 있어야 한다.

### III. 집중관측 중요 기상요소

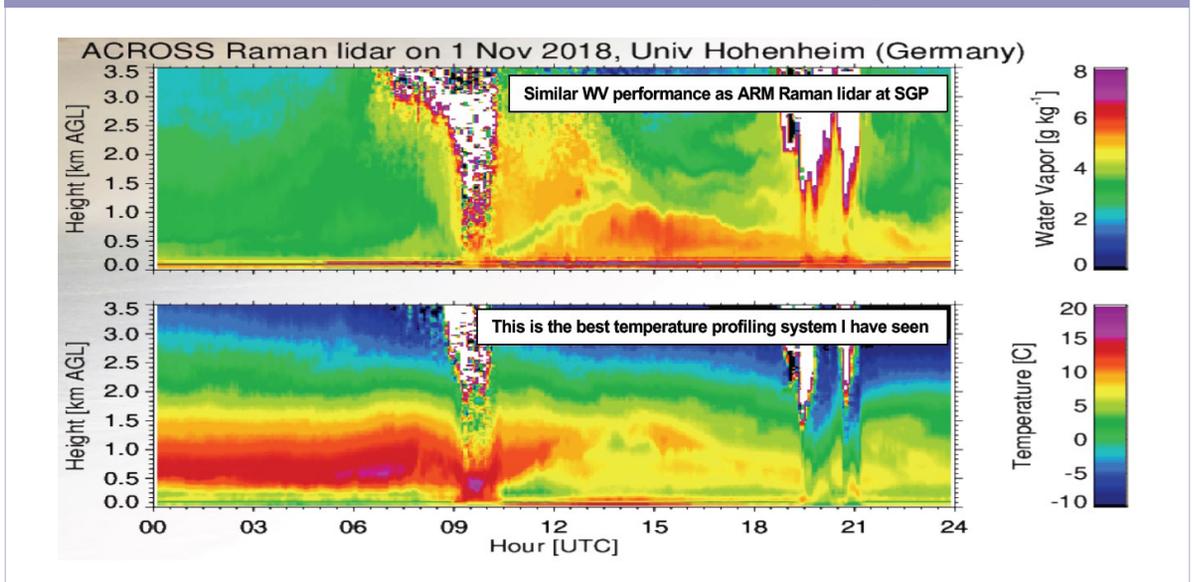
대부분의 국내 호우 집중관측은 레빈존데를 이용한 종관규모의 관측, 현업용 기상레이더 및 지상 자동기상 관측망(AWS: Automatic Weather Station)을 이용한 관측에 치중하였다. 하지만 앞에서 언급한 것과 같이 호우를 유발하는 현상은 대부분 중규모 및 미세규모의 국지 강우 현상이며, 따뜻한 계절에 종관과 중규모의

“ 국지성 호우 예측  
위해 수증기, 온도,  
바람 등 전천후  
관측이 필요 ”

상호작용에 의해 발생한다. 따라서, 국지규모에서 대류성 강수의 생성전-생성-발달-소멸의 전체 생애주기 동안 대류성 강수뿐만 아니라, 이를 유발하는 환경에 대한 관측이 필요하다. 즉 국지성 호우에 대한 수증기, 온도, 바람, 강수의 전천후 관측이 필요하다.

레이저를 이용하는 차등감쇠라이다(DIAL: Differential Absorption Lidar), 라만라이다(Raman Lidar), 적외선을 이용하는 적외분광계(AERI: Atmospheric Emitted Radiance Interferometer), 마이크로파 라디오미

[그림 4] 라만라이다(ARTHUS)로 관측한 수증기(상)와 온도(하) 프로파일(Prof. V. Wulfmeyer 제공)



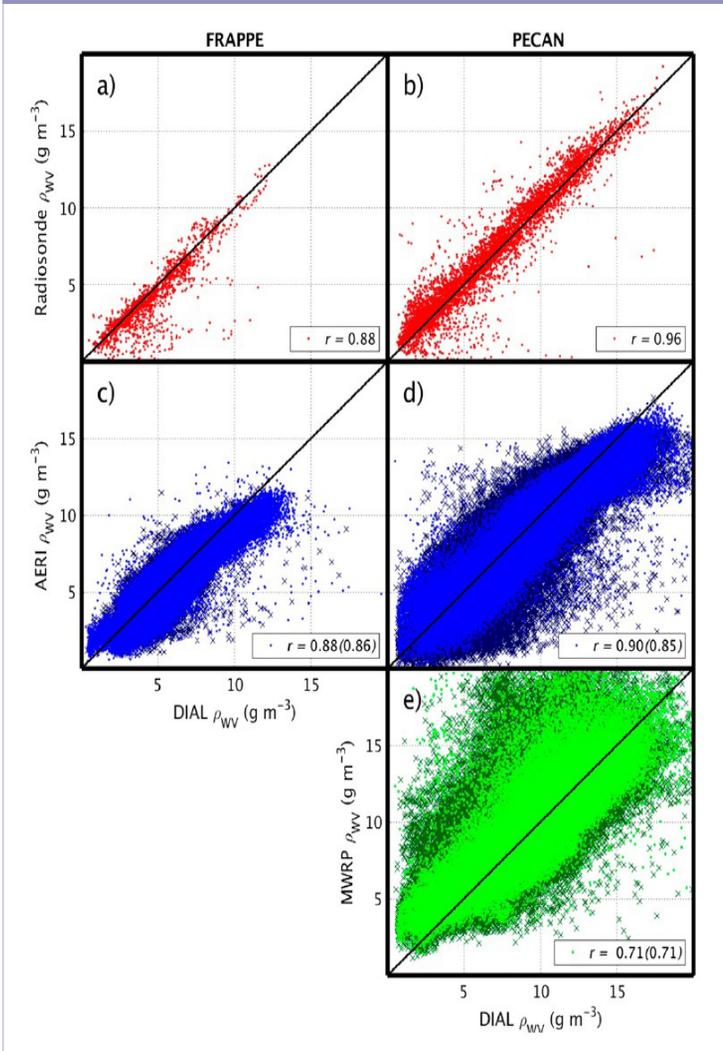
터(MWRP: Microwave Radiometer Profiler) 등을 이용하면 청천시 온도 및 수증기를 관측할 수 있다(이규원, 2020). [그림 4]는 독일에서 개발한 ARTHUS(Atmospheric Raman Temperature and Humidity Sounder)라는 라만라이다로 관측한 수증기(위) 및 온도(아래) 프로파일을 시간에 따라 나타내었다. 초기 온도 역전층이 뚜렷하며 이후 안개가 생성되면 심한 감쇠가 나타나고, 역전층이 약해지면서 하층에 수증기가 증가하는 특성이 있다. 이러한 라만라이다 및 DIAL은 고해상도의 온도 및 습도 프로파일링이 가능한 반

“ 전천후 바람 관측은 수직 측풍기로 가능 ”

면, 라디오미터는 공간해상도 및 정확도가 낮다.

[그림 5]는 두 집중관측 실험에서 획득된 DIAL, AERI, MWRP, 라디오존데 관측 자료의 상호비교로 DIAL과 존데의 비교(a, b)에서는 산포도와 편차가 비교적 적은 경향을 보이지만, AERI와 DIAL 비교(c, d)에서 산포도가 증가한다. 산포도가 가장 큰 것은 MWRP와 DIAL의 비교(e)로 MWRP의 정확도가 가장 낮음을 나타낸다.

[그림 5] 집중관측에서 획득한 DIAL, AERI, MWR, 존데 자료의 상호비교 (Weckwerth et al., 2016)



청천시 바람 관측은 수직측풍기로 가능하다. 파장대역에 따라 다양한 수직측풍기가 존재하지만, 현재 기상청에서는 1.29 $\mu\text{m}$  대역을 사용하여 대기 하층에서 바람을 주로 관측한다. 백령도, 덕적도에서는 더 긴 파장대의 수직측풍기를 이용하여 보다 높은 고도에서 바람을 관측한다. 수직측풍기는 강수시에도 바람 자료를 획득할 수 있어 전천후 관측이 가능한 유일한 장비이며, 최근 국내기술로 능동 위상배열 형태의 시스템이 개발되었다. 하지만 특정 지점에서 고도에 따른 바람 프로파일만 관측 가능하여 관측망을 조밀하게 확보하여야 하는 단점이 있다.

레이저를 사용하는 도플러 라이더(윈드라이더) 또한 대기 중의 에어로졸을 관측하여 청천시 바람을 관측할 수 있다(이규원 2020). 도플러 라이더는 도플러 기상 레이더와 유사한 원리이지만 레이저를 사용한다는 측면에서 차이가 있다. 도플러 라이더로 관측할 수 있는 대상은 대기

중 에어로졸과 구름, 강수이지만 구름 및 강수가 존재하면 강한 감쇠가 발생하여 바람 관측이 불가능하다. 따라서, 소형의 라이다들은 대부분 대기경계층에서 청천시의 바람 관측에만 적합하다.

구름이 존재할 경우 관측이 가능한 장비로는 구름레이더가 있다. 주로 Ka 또는 W 밴드 대역을 사용하여 구름입자에 의한 산란 신호를 관측하여 구름에 대한 정보를 획득한다. [그림 6]은 최근 개발된 W-밴드 이중편파 구름레이더와 W/Ka-밴드 이중 주파수 이중편파 구름레이더이다. 이들은 안개, 구름 및 약한 강수에 대한 미세물리 특성 및 바람 관측이 가능하다. 특히 기존의 연직지향레이더에서 파워스펙트럼을 이용하여 강수입자의 특성을 보다 상세하게 파악하였던 것과 유사하게 최근 이들 레이더에서 이중편파 스펙트럼 산출 알고리즘이 개발되어 파워스펙트럼상에서 이중편파의 특성을 상세히 알 수 있다. 따라서 이들 이중편파 파워스펙트럼을 이용하면 입자의 크기별 유형 및 모양 등 보다 상세한 구름입자의 특성을 파악할 수 있다. 또한 구름레이더를 망으로 구축한다면 안개, 구름이 존재할 경우에도 상세한 바람장을 도출할 수 있다.

구름입자가 큰 강수입자로 성장하면 구름레이더 신호에 강한 감쇠가 발생하여 원거리 관측이 불가능하다. 따라서 강수에 대한 역학구조 및 미세물리 특성을 관측할 수 있는 기상레이더망이 필요하다. 단파장(X-밴드) 이중편파레이더는 주로 근거리 상세 관측에 활용되어 높은 공간해상도로 중규모 및 미세규모 강수 현상을 관측할 수 있지만, 강한 강수시 감쇠가 발생한다. 따라서, 강한 강수의 원거리 관측을 위해서는 C 또는 S-밴드의 기상레이더를 활용한다. C와 S-밴드 이중편파레이더 망은 넓은 영역에서 강수의 분포 및 3차원 구조를 파악하는데에도 활용할 수 있다.

여름철 장마 또는 호우 발생시 이에 대한 감시 및 발달에 대한 정보를 파악하기

“ 전천후 관측을 위한 도플러라이다(청천), 구름레이더(구름), 다파장 기상레이더(강수) 관측망의 구축 필요 ”

[그림 6] W-밴드 이중편파 구름레이더 및 W/Ka-밴드 이중주파수 이중편파레이더



“ 관측장비의 현업 활용을 위해서는 다양한 협업 적용 실험이 필요 ”

위해서 1) 대기 경계층에서 온-습도 관측을 통한 대기안정도, 2) 서해안에서 발생하는 해륙풍과 이와 연관된 대기 구조, 3) 대기하층에서 하층제트(LLJ: Low Level Jet), 4) 대기하층 수증기속, 5) 해양이나 육지에서 존재하는 불연속 경계선, 6) 대류운 또는 대류구름열(cloud street) 발달 등에 대한 정보를 획득하여야 한다.

대기안정도는 DIAL 또는 AERI를 이용한 온-습도 관측을 통하여 계산할 수 있다. 따라서 고도에 따른 고해상도 온-습도 자료가 산출되어야 하며 정확도가 높아야 한다. 이들 두 장비를 활용하더라도 구름 및 강수시에는 안정도 산출이 어렵다. 기상청에서는 MWRP를 수직측풍기와 함께 장기간 활용하였지만, 보정의 어려움과 산출 온-습도의 부정확도 때문에 현업 활용에 어려움을 겪고 있다. 따라서 장비의 현업 활용을 위해서는 정확도 검증, 실시간 운영 진단, 현업 기상환경에서의 운영성 등 다양한 협업 적용 실험이 필요하다.

해륙풍은 수직측풍기로 관측이 가능하지만, 이들 장비가 설치된 특정 지점으로 한정된다. 그러나 스캐닝 도플러라이다를 활용하면 보다 넓은 영역에 대한 바람 획득이 가능하다. 또한 DIAL 또는 AERI를 이용하여 해륙풍과 연관된 온습도 구조도 관측하여야 한다. 하층제트(LLJ)는 청천시에는 도플러라이다, 전천후로는 수직측풍기를 이용하여 산출할 수 있다. 도플러라이다는 수직측풍기에 비해 더 높은 해상도의 자료를 제공하지만, 강수시 바람을 제공하지 못하는 단점이 있다. 강수시 기상레이더를 이용한 높은 고도각에서 QVP(Quasi-vertical profile) 바람을 생산하면 수직측풍기를 대신할 수 있다. 하지만 기상레이더의 경우 강수시 상세 3차원 구조 파악을 위하여 많은 개수의 PPI 관측을 수행하므로 강수시 수직측풍기를 대신하기 위한 추가 스캔은 목적에 따라 선택하여야 한다. 대기 하층의 수증기속은 도플러라이다, 수직측풍기의 전천후 바람 관측자료와 DIAL/AERI를 이용한 습도 자료를 융합하여 산출할 수 있다. 습도 또는 수증기 관측은 청천시 이들 두 장비로 적절하지만 강수시는 관측이 어렵다. 따라서 고해상도의 수증기속은 청천시 산출이 가능하지만 강수시에는 다른 관측 방안이 필요하다.

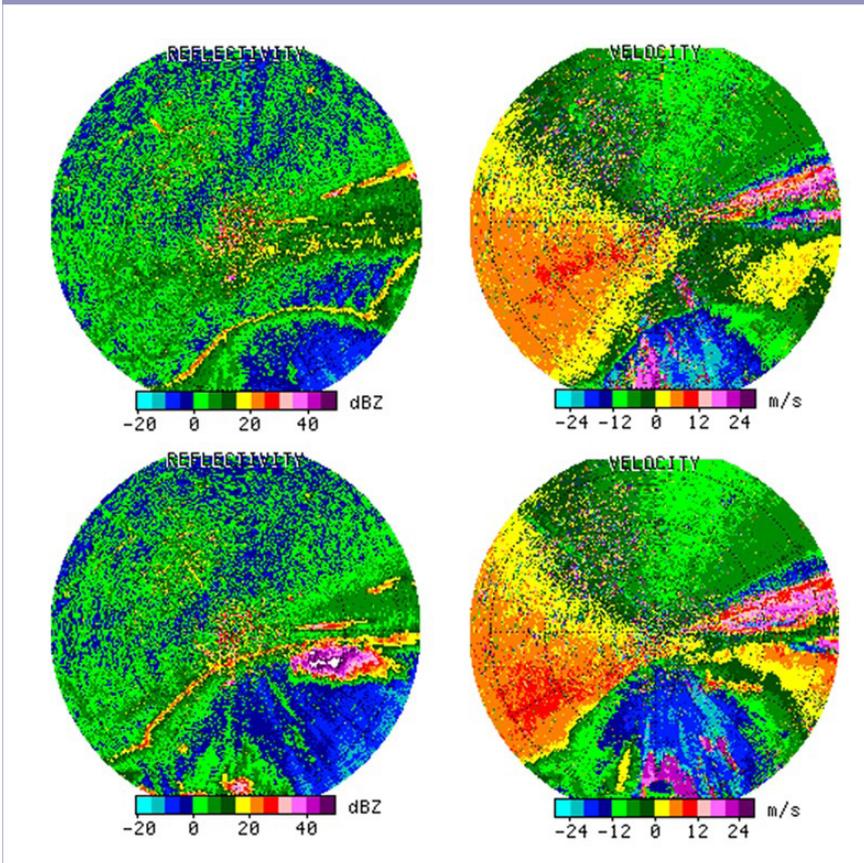
해양이나 육지에서 존재하는 불연속 경계선을 따라 많은 강수계가 발달한다

“ 경계선, 구름(열)과 같은 대류 발생인자 관측이 중요 ”

(Wilson and Mueller, 1993). 발달한 뇌우에 동반되는 돌풍전선(Gust front), 육해상에서 해륙풍 순환에 의해 발생하는 경계면 등이 대표적인 예이다. 또한 강한 강수의 발생은 대류성 구름 또는 구름열(convective roll)의 발달과 연관이 있다(Purdum, 1976). 이러한 경계선, 구름(열)은 대류강수 발생인자(trigger)로 작용하므로 이러한 인자의 관측이 중요하다. 구름 및 구름열은 스캐닝 구름레이더를 이용하면 쉽게 관측할 수 있고, 경계선의 경우 감도가 뛰어나고 스캔이 가능한 S-밴드 기상레이더로 일부 관측이 가능하다.

[그림 7]은 S-밴드 레이더로 관측한 돌풍전선 사례이다. 두 개의 뇌우가 남동쪽에서 발달하여 하강류가 생성되었고, 생성된 하강류에 의한 발산류로 인해 두 개

[그림 7] S-밴드 레이더로 관측된 반사도(좌) 및 도플러 시선속도(우)(Prof. F. Fabry 제공)



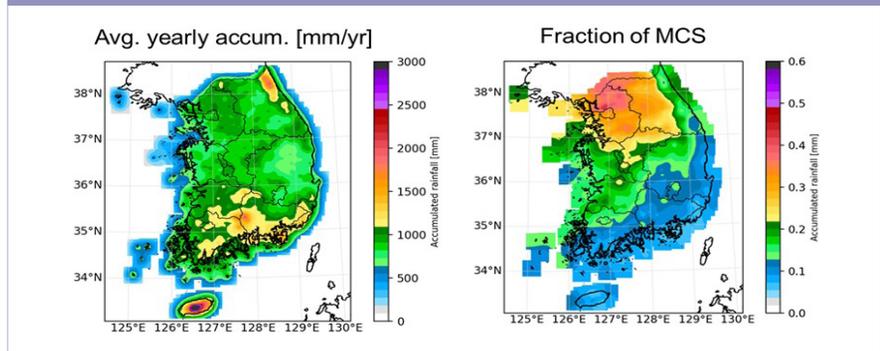
“ 대류운 발생기작 분석에 서해상의 청천 관측은 매우 중요 ”

의 돌풍전선이 생성되었다. 돌풍전선은 레이더 영상에서 곡선 모양을 나타내며 두 개의 돌풍전선이 연결되어 있다. 돌풍전선 전면에서는 레이더를 중심으로 동쪽으로 약한 대류운들이 발달하여 레이더에 관측되었다. 시선속도 영상에서는 돌풍전선을 기준으로 남쪽에서 강한 음의 시선속도가 나타나 레이더 중심으로 빠르게 접근한다. 돌풍전선이 전면에 존재하던 대류운과 충돌하면서 동쪽의 돌풍전선 후면에 강한 대류성 강수가 발달한다. 이처럼 레이더로 관측된 돌풍전선 같은 경계선은 대류 발생인자가 된다. 그러나 현재 서해상에서 발달하는 경계선이나 구름열에 대한 정보는 거의 없는 상황이다. 따라서, 대류운 발생기작의 원인규명 및 결정을 위해 감도가 높은 레이더를 이용한 서해상에서의 청천 관측은 매우 중요한 역할을 하므로 가용한 기상레이더를 배치하고 관측을 수행, 결과를 분석하는 연구가 절실히 요구된다.

#### IV. 한반도의 강수 특성

한반도 강수는 다양한 규모별 기상현상(총관규모 저기압, 중규모 대류계, 지형성 강우 등)에 기인한다. [그림 8]은 4년간 3-11월 동안 연평균강수량(왼쪽)과 이들 강수 중 중규모 대류계에 의한 강수비율(오른쪽)을 보여준다. 연평균강수량의 경우, 제주, 남부해안선과 지리산 부근, 그리고 동해안에서 최대치가 나타나고, 서울을 포

[그림 8] 2018-2021년 3-11월 연평균강수량(좌)과 중규모 대류계에 의한 강수비율(우) (KPOP(Korea Precipitation Observation Program) 발표 자료에서 인용)



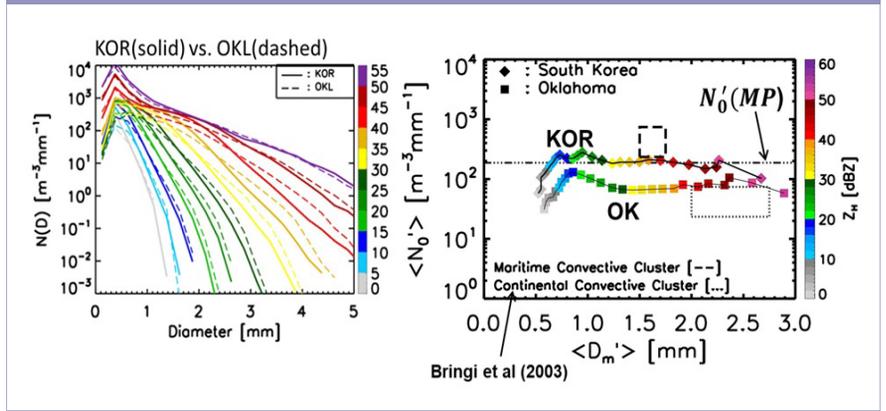
“한반도 강수들은 미세물리 측면에서 다른 지역과 큰 차이”

합한 중부지방은 강수량이 적다. 하지만 중관규모 저기압에 의한 강수들을 제외하고 중규모 대류계나 대류성 강수만을 살펴보면(오른쪽), 이들 최대치가 나타나는 지역에서 중규모 대류계에 의한 강수 비율이 급격히 줄어들고, 오히려 서울 및 경기도 지역에서 20% 이상의 높은 비율을 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 제주, 남부해안, 동해안의 많은 강수는 중관규모 현상에 의한 것으로 볼 수 있다. 이러한 중관규모 현상들은 비교적 예측 정확도가 높지만, 서울 및 경기지역에 높은 비율을 차지하는 중규모 대류계들은 국지규모로 주로 발달한다. 또한 중규모 대류계들은 지표면, 지형과의 복잡한 상호작용이 발생하여 예측 정확도가 비교적 낮다. 따라서 이러한 중규모 대류계의 예측성 향상을 위해서는 집중관측 실험, 발생기작 및 발달구조 규명 및 예측성 향상 등 이들 집중관측 자료를 활용한 연구가 지속적으로 진행되어야 한다.

한반도에서 발생하는 강수들은 미세물리 측면에서도 다른 지역과 큰 차이를 나타낸다. 특히 한반도는 대륙의 동안에 위치하고 해양으로부터 많은 수증기가 유

입되어 강수의 형성 및 성장에 많은 영향을 미친다. [그림 17는 한반도의 지상에서 장기간 관측된 강우입자 크기 분포와 건조한 대륙성 기후가 특징인 미국 오클라호마 주에서 관측한 강우입자 크기를 비교한 것이다 (Bang et al., 2020). 반사도가 유사한 입자 크기 분포(

[그림 17] 한반도와 미국 오클라호마주에서 관측한 강우입자 크기 분포의 특성 비교. 실선은 한국, 파선은 오클라호마에서 관측한 5 dBZ 반사도 간격의 평균 강우입자 크기 분포(좌), 평균입자 크기 분포에서 계산된 특성입자수농도와 특성입자 크기 분포(우)(Bang et al., 2020)



동일한 색상)를 비교하면 오클라호마에서 더 많은 수의 큰 입자들이 존재한다. 특히 반사도가 강해지면서 이러한 특징이 더욱 뚜렷하다. 또한 작은 입자 크기에서는 반대로 오클라호마 자료가 더 작은 수농도를 가진다. 직경 0.4mm 이하에서 수

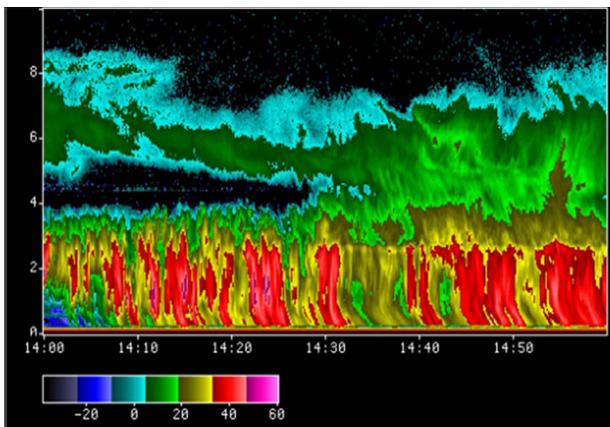
“ 강수의 미세물리 특성은 생성-발달 메커니즘 및 관련 환경에서 기인 ”

농도가 급격히 작아지는 것은 기계적인 결합으로 추정된다. 이들 평균입자크기 분포로 계산한 특성수농도( $N_0'$ )와 특성입자크기( $D_m'$ ) 또한 두 지역에서 뚜렷한 차이가 나타난다. 한반도에서 관측한 입자크기 분포가 전반적으로 모든 반사도에서 M-P(Marshall and Palmer, 1948) 입자크기 분포와 유사한 큰 값의 특성수농도 값을 가진다. 또한 동일한 반사도 값에서 한반도 입자크기 분포가 더 작은 특성입자크기를 가지며, 이러한 경향은 반사도가 증가하면서 더욱 뚜렷하다. 또한 Bringi et al. (2003)에서 제시한 특성수농도 값에 비하여 한반도는 작은 값을 보이며 오클라호마는 더 큰 값의 특성수농도를 나타낸다.

이러한 미세물리 특성은 강수의 생성-발달 메커니즘과 이와 연관된 환경에 기인한 것이다. 오클라호마의 경우 건조한 대기와 강한 열적 불안정으로 인하여 강수시스템이 연직으로 깊게 발달하며, 이러한 심층대류형의 구름 내에서는 강수입자가 구름내에 장시간 머물면서 큰 입자로 성장할 수 있는 가능성이 높다. 반면 한반도와 같이 여름철 수증기가 많이 공급되고 열적불안정이 작을 경우, 낮은 고도에서 구름이 생성되어 깊은 구름으로 발달하지 않고 온난우 과정으로 강수가 내릴 수 있다.

[그림 10]은 인천에서 연직지향레이더로 관측한 강수의 연직구조이다. 14:00-

[그림 10] 연직지향레이더로 관측한 반사도의 연직 구조. 14:00 LST-14:30 LST까지 강수운이 고도 4km까지 발달하여 강한 강수를 유발함



14:30 LST에 강수운이 고도 4km까지 발달하였다. 일반적인 여름철 용해층이 4~5km인 것을 고려하면 이 기간 동안 강수는 고체상의 강수가 포함되지 않은 온난우이다. 따라서 이 경우는 연직으로 깊게 발달하지 않은 온난우가 강하게 내린 것을 알 수 있다. 이러한 낮은 구름꼭대기를 가지면서 온난우로 발달하는 강수계는 [그림 9]에서 보인 것과 같이 작은 입자의 수농도가 높고, 큰 입자의 수농도가 비교적 낮은 입자크기 분포 특성을 보인다.

## V. 집중관측 강수 연구 방안

한반도에서 발생하는 강수는 열적불안정이 크지 않은 대기환경에서 구름꼭대기가 낮은 온난우가 빈번하게 발생하는 등 다른 지역과 비교하여 매우 다른 특성을 보인다. 이러한 빈번한 온난우는 입자크기분포에 뚜렷한 특성을 나타낸다. 즉 입자크기 분포는 건조한 환경에 비해(미국 오클라호마) 더 많은 수의 강우입자와 평균입자크기가 작은 특징이 있다. 이같은 한반도 발생 강수의 뚜렷한 미세물리적 차이를 이를 유도하는 역학 및 열역학적 특성에 기인하며, 이로 인한 열적 피드백은 건조기 후와는 큰 차이가 있다. 따라서 한반도에서 발생하는 호우에 대한 예측성 향상을 위해서는 1) 구름/강수에 대한 상세 물리적 특성, 2) 호우의 생성-발달과 연관된 역학, 열역학 특성, 3) 물리과정과 역학 및 열역학과정의 상호작용에 대한 이해가 선행되어야 한다. 또한 다양한 과정의 이해를 기반으로 수치모델의 물리 모수화를 개선하여 한반도 물리과정에 최적화된 모델을 구축하여야 한다. 이러한 전반적인 개발 과정을 지원할 수 있는 관측 테스트베드를 구축하고 이를 이용한 집중관측을 체계적으로 수행하여야 한다. 그리고 수집된 집중관측 자료를 최적으로 모델에 동화할 수 있는 기술도 개발되어야 할 것이다.

테스트베드를 통한 집중관측으로 관측-모델-예측-검증의 밸류 체인을 구축하여야 한다. 사용자 및 사회적 요구, 현업적 요구, 기본과정의 이해를 충족하기 위한 새로운 관측체계를 테스트베드에 구축하고 이를 이용하여 다양한 기상현상 및 연관된 물리/역학과정을 이해하고 이를 기반으로 모델과 예측을 개선하여야 한다. 집중관측에서 획득된 자료를 이용하여 모델 결과에 대한 체계적이고 종합적인 검증 및 평가를 진행해야 하며, 평가 결과를 기반으로 새로운 관측체계의 효과를 평가하고 이를 테스트베드에 반영하는 체계의 구축을 통해 새롭게 개발된 기술의 현업화에 다가갈 수 있을 것이다.

호우 발생, 진화에 대한 이해, 수치모델 개선 및 예측성 향상을 위해서는 1) 대기 하층 특히 경계층에서 수증기, 온도, 바람에 대한 전천후 관측, 2) 강수의 발생-진화, 물리적 특성 파악을 위한 원격탐사(구름레이더, 기상레이더) 기반 3차원 강수

“ 관측 테스트베드 구축 및 집중관측 체계적 수행, 집중관측자료 기반 모델 개선 ”

“첨단관측장비들이 테스트베드 구축 및 집중관측 통해 현업에 적극 활용 될 수 있을 것”

및 미세물리 구조 관측, 3) 여름철 대류 발생과 연계된 해륙풍 순환, 하층제트 및 수증기속, 뇌우에 동반된 돌풍전선 및 찬공기फल 등에 대한 관측이 필수적이다. 현재의 현업 관측망은 이러한 호우 예측성 향상을 위한 관측에 최적화되어 있지 않다. 대기경계층에서 바람, 온도, 특히 수증기에 대한 관측은 청천시에는 최근 개발 중인 레이저 기반의 도플러라이더, DIAL 등으로 가능할 것이며, 수직측풍기는 전천 후 바람을 제공할 수 있다. 구름 및 강수의 3차원 관측은 구름레이더 및 기상레이더망을 활용할 수 있다. 또한 대류 발생인자에 대한 관측은 도플러라이더/수직측풍기 및 DIAL을 동시에 이용하거나 청천 관측이 가능한 감도 높은 구름 및 기상레이더를 활용할 수 있다. 이러한 첨단관측장비는 테스트베드 구축 및 집중관측을 통하여 지속적으로 운영하고 효과를 분석하며, 현업화를 위한 다양한 시험단계를 거쳐 현업에 효율적으로 적극 활용될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- 이규원, 2020: 중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언. 30, 91-105.
- Bang, W., G. Lee, A. Ryzhkov, T. Schuur, K.-S. Lim, 2020: Comparison of microphysical characteristics between the southern Korean peninsula and Oklahoma using two-dimensional video disdrometer data. *J. Hydrometeorol.* 21, 2675-2690.
- Bringi, V.N.; V. Chandrasekar, J. Hubbert, E. Gorgucci, W.L. Randeu, M. Schoenhuber, 2003: Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis. *J. Atmos. Sci.* 2003, 60, 354-365.
- Dabberdt, W., T. W. Schlatter, F. H. Carr, E. W. J. Friday, D. Jorgensen, S. Koch, M. Pirone, F. M. Ralph, J. Sun, P. Welsh, J. W. Wilson, and X. Zou, 2005: Multifunctional mesoscale observing networks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(7), 961-982.
- Houze, R. A., 2004: Mesoscale convective systems. *Rev. Geophys.*, 42, RG4003, <https://doi.org/10.1029/2004RG000150>.
- Houze, R. A., Smull, B. F., & 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)
- Jo, E., C. Park, S.-W. Son\*, J.-W. Roh, G. Lee and Y. H. Lee, 2020: Classification of localized heavy rainfall events in South Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 56, 77-88.
- 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).
- Marshall, J.S., W.M.K Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Meteorol.* 1948, 5, 165-166.
- Purdom, J. F. W., 1976: Some uses of high resolution GOES imagery in the mesoscale forecasting of convection and its behavior. *Mon. Wea. Rev.*, 104, 1474-1483.
- Stith, J. L., D. Baumgardner, J. Haggerty, R. M. Hardesty, W.-C. Lee, D. Lenschow, P. Pilewskie, P. L. Smith, M. Steiner, and H. Vomel, 2018: 100 years of progress in atmospheric observing systems. 2.1-2.55, <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0006.1>.
- 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>.
- Wilson, J. W., and C. K. Mueller, 1993: Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution. *Wea. Forecasting*, 8, 113-131.

# 양자컴퓨팅과 일기예보: 장마와 집중호우를 중심으로

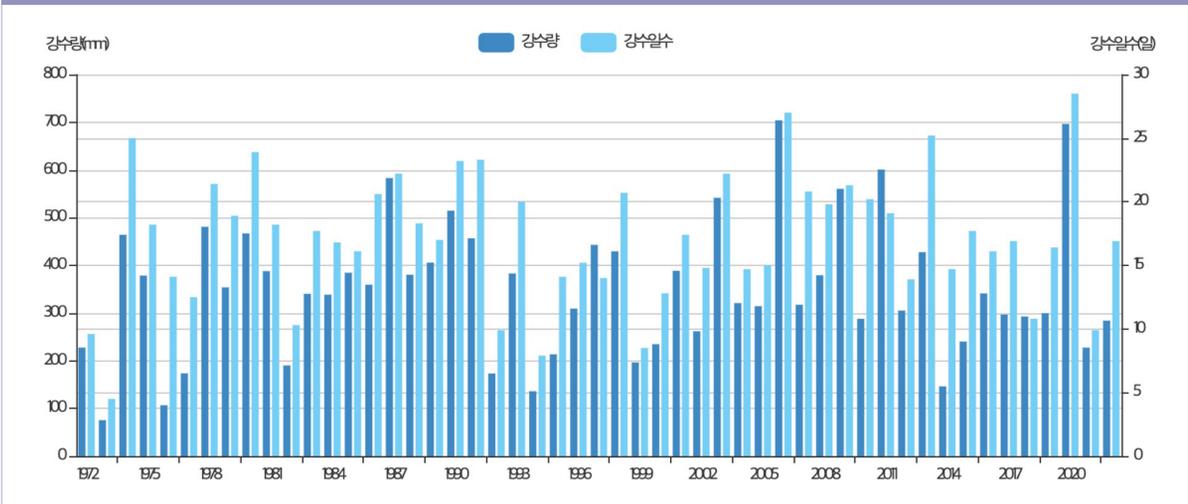
방승현 오리엔텀 대표이사 silkroad2001@orientom.com

- I. 기후 변화와 장마 예측
- II. 양자컴퓨터의 동작 원리
- III. 양자컴퓨터를 사용한 장마 예측
- IV. 양자컴퓨터의 장점과 현재 기술의 문제점
- V. 일기예보를 위한 양자컴퓨팅 활용 사례
- VI. 결론 및 제언

최근 기후변화로 인하여 날씨 변동성이 커지고 있어, 기존에도 쉽지 않던 장마기간 및 강우량 등에 대한 예측이 더욱 어려워지고 있다. 일반적으로 일기예보는 다양한 관측데이터를 기반으로 한 대규모 미분방정식을 풀게 되는데, 고해상도의 데이터를 활용하여 예측 성능을 높이기 위해서는 시스템의 규모가 기하급수적으로 커질 수밖에 없다. 최근의 양자컴퓨터 발전으로 인하여 시스템의 크기가 증가하여도 효율적으로 연산을 수행할 수 있는 길이 열리게 되어 이를 활용한 기후예측 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 현재의 양자컴퓨터는 큐비트 수의 한계로 인하여 범용적인 컴퓨팅보다는 수치해석 및 미분방정식 풀이 등 전체 시스템의 일부로 활용되고 있어, 기존의 슈퍼컴퓨터와 GPU 시스템 등이 포함되어 최적화된 자원 활용을 수행할 수 있는 이기종 시스템을 고려할 필요가 있다. 이를 위하여 양자컴퓨팅 연구자와 시스템 개발자 및 기상학자 간의 긴밀한 협업이 필요하다. ■



[그림 1] 장마기간 중 전국 평균 강수량 및 강수일수(기상자료개발포털, 2023)



기존 컴퓨터의 소자는 저전력, 고성능을 달성하기 위하여 선풍에 대한 공정기술을 꾸준히 개선해 왔다. 선풍을 줄일수록 단순히 집적도만 올라가는게 아니라 누설 전류와 작동 전압을 모두 낮출 수 있기 때문에, 현재 반도체 칩의 발전을 공정의 미세화와 동일한 의미로 사용하고 있다. 하지만 양자역학적인 문제로 인하여 공정을 무한정 미세화할 수 없게 되었다. 반도체 공정이 수 나노미터 단위로 정밀해져 회로의 선풍이 작아지게 되면 양자역학적인 현상이 나타나게 된다. 회로의 선풍이 원자 크기까지 줄어들어 트랜지스터의 막힌 통로를 양자가 통과해 버리는 양자 터널링 현상이 바로 그것이다. 이로 인하여 소자가 스위치의 역할을 제대로 하지 못하는 문제 때문에 트랜지스터 발전이 더뎠고, 이를 극복하기 위한 기술들이 연구되고 있다. 양자컴퓨터는 기존 소자에서는 장애물로 작용하는 양자 현상을 적극적으로 사용하여 더 높은 성능을 가지는 컴퓨터를 만들게 되는데, 이때 주로 사용하는 양자 현상은 <표 2>와 같다.

<표 2> 양자컴퓨터를 만드는데 사용되는 양자 현상(정보통신신문, 2020)

- 상태값이 0이나 1로 확정적이지 않고 동시에 공존하는 중첩성
- 두 양자쌍 간에 상관관계가 존재할 경우 거리를 멀리 떨어뜨려 놓아도 한 쪽의 상태가 다른 쪽의 상태를 결정하는 양자 얽힘
- 상태값이 확률로서만 존재하는 불확정성
- 측정하는 순간 0이나 1로 결정되고 확정된 이후로는 이전으로 되돌릴 수 없는 비가역성

“ 양자컴퓨터는 정보를 0과 1의 상태를 동시에 갖는 큐비트 단위로 연산 및 저장 ”

양자컴퓨터의 성능이 높다고 하는 것은 앞에서의 증첩성을 주로 이야기 하는데 이를 조금 더 자세히 알아보도록 하자. 일반 컴퓨터는 정보를 0과 1의 비트 단위로 처리하고 저장하는 반면, 양자컴퓨터는 정보를 0과 1의 상태를 동시에 갖는 큐비트 (qubit) 단위로 연산·저장한다. 기존 컴퓨터의 경우 정보는 0이나 1인 둘 중의 하나의 값만을 가지게 된다. 그러나 큐비트이라 불리는 양자정보의 기본단위는 0과 1 두 개의 상태가 중첩되어 나타날 수 있게 된다. 그렇기 때문에 기존 컴퓨터에서는 한번에 하나의 값만 계산이 되지만, 양자컴퓨터에서는  $2^n$ (큐비트 수) 만큼의 상태가 중첩될 수 있어서 한번에 모든 연산을 수행할 있다. 큐비트가 3개면 8개 연산이 동시에 가능하고, 53개면 이론상으로는 9,000조 개의 연산이 동시에 가능하게 된다. 이와 같은 계산 방법을 '양자병렬계산'이라고 부르고, 이를 활용하여 복잡한 연산을 단숨에 수행하게 되는 것이다(표 3).

〈표 3〉 디지털 기술과 양자 기술의 비교(투이컨설팅, 2018)

구분	디지털 기술	양자 기술
연산 개념도		
정보 단위	Bit (0 또는 1)	Qubit (Quantum bit)
연산 방법	논리 표에 의한 계산	행렬 함수에 의한 계산
외부 잡음	오류 정정이 쉬움	오류 정정이 어려움
n비트의 정보량	0~2n-1 중 1개 값만 기억 n bit 논리연산장치는 1번 연산 동작	2n의 모든 값을 기억(중첩) n qubit ALU는 2n 연산 동작
연산 동작 처리량	<p>3비트의 경우 정보처리 8회(반복 계산)</p>	<p>3큐비트의 경우 정보처리 1회(동시 계산)</p>

“ 양자컴퓨터 상용화  
 위해 소재개발,  
 반도체 제조공정  
 기술, 극저온 냉각  
 기술 등이 필요 ”

양자컴퓨팅 기술은 그야말로 현존하는 모든 과학기술의 집약체이다. 지금까지 할 수 없었던 계산을 저전력으로 가능하게 해주는 시스템은 장밋빛 미래를 담보하지만 이를 얻어내기 위해서는 아래와 같은 높은 수준의 기술력이 담보되어야 한다 (SPRI, 2021).

- 1) 외부에서 제어 가능하고 수백만 큐비트까지 확장 가능하며, 적은 에러율과 수많은 연산을 수행할 수 있을 정도의 긴 양자 상태를 유지할 수 있는 소재
  - 2) 기본적인 큐비트 설계기술과 이를 실현시킬 나노급 반도체 제조공정기술
  - 3) 반도체패키징 기술 및 수백수천 채널 이상 다중 고주파 측정 기술
  - 4) 양자 중첩현상이 유지되는 것을 결맞음이라 하는데, 이 상태를 유지하기 위하여 필요한 시공간적으로 균일한 극저온 냉각기술
  - 5) 이온이나 원자를 제어하고 정보를 읽고 쓰기 위한 초정밀 레이저광학기술
  - 6) 양자적 계산을 위한 수학적 알고리즘 및 소프트웨어
- 현재까지 이를 모두 만족하는 플랫폼은 개발되어 있지 않지만, 많은 회사에서 상용 가능한 양자컴퓨터를 만들기 위하여 꾸준한 투자를 진행하고 있다.

### III. 양자컴퓨터를 사용한 장마 예측

#### 1. 양자컴퓨터와 일기예보

현재까지 가장 발전한 형식의 예보 방법인 '수치 예보'는 바람, 대류, 태양 복사, 습도, 지형 등에 대한 다양한 관측정보를 입력정보로 넣어 이를 대기의 운동이나 상태의 변화를 설명하는 유체역학 방정식(Navier-Stokes)을 풀어 현재 대기 상태에 더해 미래의 운동과 상태를 수학적으로 산출하는 방식이다. 컴퓨터 성능의 급격한 발전과 위성, 레이더 등 기상관측 장비의 사용으로 인해 수치예보 기술과 정확도는 획기적으로 개선되어 왔다. 하지만 유체역학 방정식의 비선형성으로 인하여 초기 값이 약간만 틀어져도 결과적으로는 엄청난 차이를 보이는 이른바 나비효과

“ 현재까진 기존 방정식을 양자 컴퓨터에 맞게 활용하는 것에 초점이 맞춰짐 ”

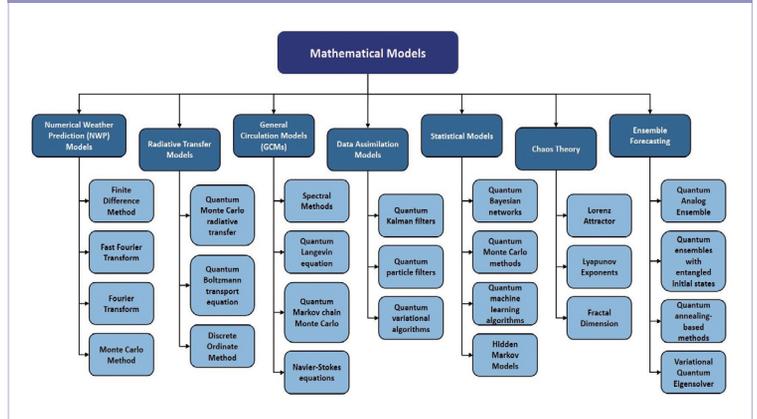
제로 인하여 장기 예측은 난이도가 매우 높다.

양자컴퓨터는 일기예보 연구에 상당한 기여를 할 수 있는 높은 잠재력을 가지고 있다. 앞서 설명했듯이 양자컴퓨터는 병렬처리 기능을 사용하여 복잡한 기상시스템의 시뮬레이션을 수행하게 된다. 그리고 이를 통하여 기존 컴퓨터보다 훨씬 빠른 속도로 복잡한 시뮬레이션과 계산을 수행할 수 있다. 이러한 시뮬레이션은 대기압, 온도, 습도 및 풍속과 같은 다양한 변수를 고려한 기상모델을 만들어 미래의 날씨 패턴에 대한 정확한 예측을 하는 데 사용할 수 있다. 그리하여 날씨모델링의 정확도와 정밀도가 향상될 뿐만 아니라 고속으로 대규모 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

## 2. 일기예보에서 양자 시뮬레이션을 위한 수학적 모델

양자컴퓨터의 일기예보 시뮬레이션에는 지구의 대기를 설명하는 수학적 모델과 방정식을 양자컴퓨터의 양자 상태 및 작동으로 인코딩하는 작업이 포함된다. 결국 양자컴퓨터는 수학적 모델링을 수행하는 역할을 담당하기 때문에, 장마 및 집중호우 예측에 대한 성능은 수학적 모델링에 달려있다고 해도 과언이 아니다. 현재까지는 기존에 사용하던 방정식을 양자컴퓨터에 맞게 활용하는 것을 우선으로 하고 있다. 예를 들어 일기예보에서는 유체역학 기반의 문제 및 시뮬레이션을 많이 사용하게 되는데, 유체역학을 해결하는데 핵심적인 비선형 미분방정식을 양자컴퓨팅에 적용하기 위한 접근방식이 주로 연구되고 있었다. 하지만 기존 방식과 다르게 양자컴퓨터를 활용하는 방식도 고려되고 있는데, 고전컴퓨터와 양자컴퓨터를 조합하여 성능 개선을 추구하는 하이브리드 양자컴퓨팅 연구가 그 중 하나이다. [그림 2]. 기존의 날씨모델을 양자컴퓨터 알고리즘으로 변환하는 것부터 접근한다면, 더욱 복잡한 모델링과 대량

[그림 2] 일기예보의 양자적 수학 모델링(예시)(Medium, 2023)



“ 일기예보를 위해서  
데이터 분석,  
알고리즘 설계,  
양자회로 설계,  
하드웨어 구현,  
기존 시스템과의  
통합이 포함됨 ”

의 데이터를 처리할 수 있는 양자컴퓨터의 이점을 살려 모델의 성능과 정확성을 잠재적으로 향상시킬 수 있다. 다만, 양자컴퓨터에 특화되어 이를 활용할 수 있는 모델링에 대한 연구는 초기 단계에 머물러 있기 때문에, 앞으로 이에 대한 연구를 통하여 속도와 성능에 대한 추가 개선도 가능할 것이라고 예상된다.

### 3. 양자컴퓨터를 사용한 일기예보 작업 프로세스

그렇다면 양자컴퓨터를 실제로 일기예보에 활용하기 위해서는 어떤 과정을 거쳐야 할지에 대해서 알아보자. 일기예보를 위한 양자컴퓨터의 작업에는 데이터 분석, 알고리즘 설계, 양자회로 설계 및 하드웨어 구현의 조합과 함께 기존의 일기예보 시스템과의 통합이 포함된다. 다음은 일기예보에 양자컴퓨터를 사용하는 단계에 대한 개요이다.

- 1) 데이터 수집 및 전처리: 위성 이미지, 레이더데이터 및 기상관측소 관측과 같은 기상 데이터를 다양한 소스에서 수집하여 데이터베이스에 저장한다. 이후 데이터 전처리를 수행하게 되는데 이는 데이터의 정리, 형식 지정, 이상값 제거, 누락된 데이터의 보간 및 데이터를 양자컴퓨팅에 적합한 형식으로 변환하는 작업이 포함될 수 있다.
- 2) 양자 알고리즘 설계: 연구원들은 기상자료를 처리하고 미래의 날씨 패턴을 예측할 수 있는 양자 알고리즘을 개발하게 된다. 이러한 알고리즘에는 양자 기계학습, 양자 최적화 또는 양자 시뮬레이션과 같은 기술이 포함될 수 있다.
- 3) 양자 회로 설계: 양자 알고리즘은 양자 상태에서 필요한 계산을 수행하는 양자 게이트 시퀀스인 양자 회로로 변환된다. 이 양자 회로 설계 부분은 앞으로 많은 회사에서 원하는 회로를 더 쉽게 변환될 수 있도록 추상화된 형태의 패키지로 개발될 것으로 예상된다.
- 4) 양자 회로 구현: 양자 회로는 일반적으로 소수의 큐비트를 포함하는 칩으로 구성된 물리적 양자컴퓨터에서 구현된다. 이는 양자컴퓨터에서 제공하는 플랫폼 위에서 자동으로 변환되도록 개발되고 있다.

“패키지 활용시  
기존 엔지니어들도  
양자컴퓨터에 쉽게  
접근할 수  
있을 것”

- 5) 실행 및 후처리: 양자컴퓨터에서 실행된 알고리즘의 결과는 기존 컴퓨터 혹은 양자컴퓨터 내에서 후처리되어 날씨예측을 생성한다. 후처리에는 예측을 구체화하고 정확도를 추정하기 위한 통계분석 또는 기계학습 기술이 포함될 수 있다.
- 6) 기존 시스템과의 통합: 양자컴퓨터에 의해 생성된 일기예보는 기존 일기예보시스템과 통합되어 최종 예보를 생성한다. 여기에는 양자 예측을 전통적인 날씨 모델 또는 통계 기법과 결합하는 것이 포함될 수 있다.

앞서 살펴보았을 때 양자컴퓨터의 동작 방식은 기존 GPU나 FPGA(Field Programmable Gate Array) 프로그래밍 같은 이기종 시스템과 별 차이가 없다. 실제로 양자컴퓨팅이라고 하면 양자역학의 난해함으로 인하여 시도를 포기하는 사람도 있지만, 일반적인 프로그래밍도 반도체의 동작원리나 어셈블리어(기계어)를 이해하고 나서 시도하는 사람은 거의 없듯이, 패키지 등이 충분히 갖춰져서 추상화가 진행된 환경부터 출발한다면 기존 엔지니어들도 양자컴퓨터에 쉽게 접근할 수 있을 것으로 예상된다.

## IV. 양자컴퓨터의 장점과 현재 기술의 문제점

### 1. 양자컴퓨터 활용시의 장점

- 1) 정확도 향상: 양자컴퓨터는 많은 양의 데이터를 처리하고 복잡한 시뮬레이션을 실행하여 보다 정확한 날씨 및 기후예측을 제공하는 데 도움이 될 수 있다.
- 2) 시간 효율성 향상: 양자컴퓨터는 또한 시뮬레이션을 실행하고 데이터를 처리하는 데 필요한 시간을 줄여 일기예보 및 기후모델링을 보다 효율적으로 만드는 데 도움이 될 수 있다. 이는 많은 계산을 병렬로 수행할 수 있는 능력 때문에 더 많은 관측값을 사용하여도 성능 저하 없이 기존 컴퓨터보다 훨씬 빠르게 정보를 처리할 수 있다는 것을 의미한다.
- 3) 사용 전력의 감소: 기상청에서 운영하고 있는 슈퍼컴퓨터는 그 사용 전력량이

“ 큐비트 수 제한,  
높은 오류율,  
알고리즘 부족은  
해결해야 할  
문제 ”

수 MW에 이르는데, 이는 수천 가구가 사용할 수 있는 전력량이다. 양자컴퓨터에 대한 장점으로 많이 나오는 것 중의 하나가 전력을 적게 사용하기 때문에 친환경이라는 이야기를 하게 된다. 다만 고려해봐야 할 것이 하나 있는데, 양자컴퓨터의 경우에는 이론적으로 큐비트의 연산시에는 거의 에너지를 사용하지 않지만, 대부분 에너지를 시스템을 절대 영도 가까이 만들어야 되는 등 양자 얽힘을 유지시키는 것에 사용되기 때문에, 실제로 친환경인지는 좀 더 고민을 해봐야 할 것이다.

## 2. 현재 기술의 문제점

앞선 설명에서는 양자컴퓨터로 장마와 집중호우를 모두 예측하는 것이 지금이라도 가능할 것처럼 보인다. 하지만 현재까지의 기술 수준에서는 실용화가 쉽지 않은데 그 이유는 아래와 같다.

- 1) 큐비트 수 제한: 양자컴퓨터의 연산 능력은 큐비트의 수에 따라 결정되지만 현재까지 나와 있는 양자 시스템은 큐비트 수가 제한된다. 특히 관측시 최대 큐비트의 개수만큼만 출력이 가능하다. 이는 다수의 관측을 예측하려는 일기예보에 대한 적용이 어려운 원인이 된다. 2022년 기준, IBM에서 개발한 433 큐비트가 세계에서 가장 높은 수준의 양자컴퓨터라고 할 수 있고, 이 큐비트 수를 늘리는 기술 개발이 계속 진행 중에 있다.
- 2) 오류율: 양자 시스템은 매우 민감하며, 양자 단위인 큐비트는 진동과 열 등 외부 환경에 매우 취약하다. 이로 인해 양자컴퓨터의 큐비트는 연산 도중 손실되거나 에러가 발생할 수 있다. 플랫폼마다 차이는 있지만 아직까지는 오류율이 상당히 높은 편이기 때문에, 오류를 수정하고 안정성을 개선하는 알고리즘 및 하드웨어 개발이 진행 중이다.
- 3) 알고리즘의 부족: 현재까지 개발된 전통적인 컴퓨터와는 다른 알고리즘과 프로그래밍 모델을 필요로 하지만, 아직 소프트웨어의 발전 수준은 걸음마 단계이기 때문에 이에 대한 연구와 개발이 더 필요하다.

“ 일기예보 활용  
위해  
Pasqal, BASF,  
Rigetti  
Computing,  
Fujitsu 등  
기업들이  
기술개발에  
도전 중 ”

## V. 일기예보를 위한 양자컴퓨팅 활용 사례

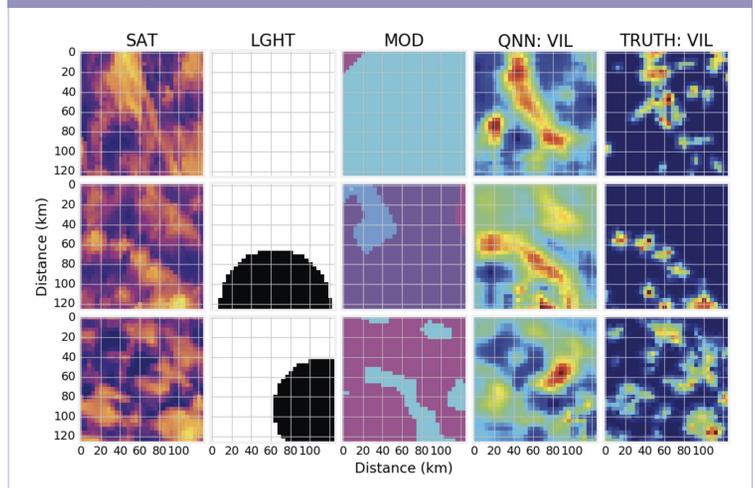
### 1. Pasqal과 BASF(Badische Anilin und Soda Fabrik)

중성 원자 양자 프로세서 개발사인 Pasqal은 세계 최대 화학기업인 독일의 BASF와 파트너십을 체결하고, 기상 관련 프로젝트에 Pasqal의 양자 알고리즘을 적용하는 방법을 연구하고 있다. 이 프로젝트는 미분방정식을 풀기 위한 Pasqal의 독점적인 양자 알고리즘 제품군 중 하나인 미분 가능 양자 회로(DQC) 알고리즘 제품군을 날씨 패턴 예측 문제에 맞게 파라미터화(맞춤형, 애플리케이션별 맞춤화), 구현(실행) 및 테스트(벤치마크)하는 것을 목표로 하고 있다(Quantum Technology News, 2022).

### 2. Rigetti Computing

Rigetti Computing은 고품질 합성 기상레이더 데이터를 생성하고 폭풍 예측을 위한 기존 모델을 개선하기 위하여 고전 및 양자 기계학습 기술의 조합을 사용한 새로운 솔루션을 개발하였다(그림 3). 이 솔루션은 지도학습된 양자머신에서 생성된 합성데이터를 사용하여 기존과 동일한 수준의 성능을 얻어냈고, 고전적인 신경망 중의 하나의 레이어를 양자 컨볼루션 레이어로 변경하여 성능 향상을 이끌어 냈다고 발표하였다(Enos et al., 2021).

[그림 3] Rigetti에서 사용한 테스트 데이터와 그 결과



### 3. Fujitsu

Fujitsu는 일본 기상청에 선상 강수대 및 폭우 예측을 위한 슈퍼컴퓨터 시스템을

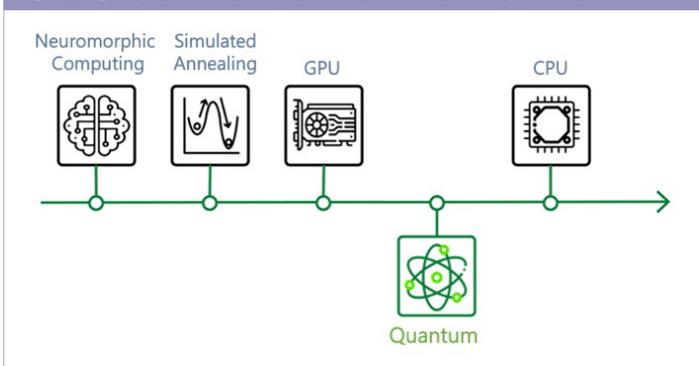
“ 여러 유형의 특수 컴퓨팅 자원을 결합하여 실시간/병렬성을 구현하는 것이 최선 ”

제공하고 있다. 양자에서 영감을 받은 컴퓨팅 디지털 어닐러 슈퍼컴퓨터(Fugaku)와 양자컴퓨터(HPC 기술) 및 양자시뮬레이터(양자 인스파이어드 기술)를 이용하여 양자-HPC 하이브리드 계산 기술 개발과 계산시간 추정 기술을 개발 중에 있다. 의료 및 제약, 자연재해(기후변화) 및 환경, 에너지 및 생산에 대한 일반 대중의 관심이 높은 다양한 응용 분야에 사용될 것으로 예상된다(Fujitsu, 2023).

## VI. 결론 및 제언

일기예보에 양자컴퓨터를 사용하는 것에 대한 연구가 있었지만 아직 초기 단계에 있으며 이 응용 프로그램의 타당성과 실용성을 입증하기 위해 더 많은 작업을 수행해야 한다. 현재까지의 연구는 양자컴퓨터를 유용하게 만드는 데 필요한 알고리즘과 인프라를 개발하는 데 중점을 두고 있다. 일기예보를 위한 양자컴퓨터는 아직 실험 단계에 있으며 필요한 알고리즘, 소프트웨어 및 하드웨어를 개발하기 위해 많은 작업이 필요하다. 아직 양자컴퓨터가 온전히 상용화되지 않은 상황에서는 양자컴퓨터만으로 장마와 집중호우모델링을 수행하는 것은 불가능에 가깝다. 그렇기

[그림 4] 다양한 플랫폼의 장점을 취할 수 있는 이기종 시스템 예시



때문에 [그림 4]처럼 여러 유형의 특수 컴퓨팅 자원을 결합하여 실시간/병렬성을 구현할 수 있도록 하는 것이 현재로서는 가장 최선의 선택이라고 생각한다. 핀란드의 VTT를 시작으로 세계 각국에서 슈퍼컴퓨터에 양자컴퓨터를 연결한 이기종 시스템을 구축하고 있고, 이러한 추세는 더욱더 가속화될 것으로 예상된다. 이와 같은 시스템 구

축을 위하여 슈퍼컴퓨터, GPU 머신, 양자컴퓨터를 최적 성능으로 통합할 수 있는 공학적인 기초가 만들어져야 하고, 이는 양자컴퓨터 엔지니어, 프로그래머, 기상학자들이 모두 협업할 때 달성될 수 있을 것이다.

오리엔티어와 같은 많은 기술 기반의 회사에서는 수학적 모델링을 양자컴퓨터로 전환하고 이를 통합하여 서비스를 수행할 수 있도록 양자컴퓨터 엔지니어와 프로그래머를 확보하였지만, 이를 장마와 집중호우 같은 도메인 지식이 절대적으로 필요한 연구에 있어서는 기상학자 같은 도메인의 전문가와의 협업이 절대적으로 필요하다. 양자컴퓨터 기술에 대한 투자와 산·학·연 간의 공동연구를 통하여 한국이 한 번도를 넘어서 세계적인 기상 강국으로 도약하길 희망한다.

### 참고문헌

- [https://spri.kr/posts/view/23363?code=data\\_all&study\\_type=&board\\_type=industry\\_trend](https://spri.kr/posts/view/23363?code=data_all&study_type=&board_type=industry_trend) 기상자료개방포털, 2023.06.20.: <https://data.kma.go.kr/>
- 기상청, 2022: 장마백서 2022.
- 정보통신신문, 양자컴퓨팅, 통신보안에 IoT까지 영역 확장, 2020.10.16.: <https://www.koit.co.kr/news/articleView.html?idxno=79927>
- 투이컨설팅, 다가오는 컴퓨팅 혁명, 퀀텀 테크놀로지, 2018.12.21.: <https://www.2e.co.kr/news/articleView.html?idxno=204388>
- Enos, G. R., Reagor, M. J., Henderson, M. P., Young, C., Horton, K., Birch, M., Rigetti, C., 2021: Synthetic weather radar using hybrid quantum-classical machine learning (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2111.15605>
- Fujitsu, 2023.2.27.: Fujitsu provides supercomputer system to the Japan Meteorological Agency for forecasting of linear rainbands and torrential rains, <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2023/0227-03.html>
- Medium, 2023.5.19.: Quantum Computers: Advancement in Weather Forecasts and Climate Change Mitigation, <https://copperpod.medium.com/quantum-computers-advancement-in-weather-forecasts-and-climate-change-mitigation-9b5471a56ba9>
- SPRI, 2021.12.27.: 디지털을 넘어 양자시대를 준비하는 양자컴퓨터, [https://spri.kr/posts/view/23363?code=data\\_all&study\\_type=&board\\_type=industry\\_trend](https://spri.kr/posts/view/23363?code=data_all&study_type=&board_type=industry_trend)
- Quantum Technology News, 2022.7.22.: BASF collaborates with Pasqal on weather modeling and more, <https://www.insidequantumtechnology.com/news-archive/basf-collaborates-with-pasqal-on-weather-modeling-and-more-2/>

# 수치해석기반 기상 및 기후예측을 위한 양자컴퓨팅의 실현 가능성 연구

안도열 서울시립대학교 교수/(주)퍼스트퀀텀 CTO dahn@uos.ac.kr

- I. 기존 수치기상 및 기후예측 모델의 한계
- II. 양자컴퓨팅기반의 전산유체역학
- III. 맺음말

양자컴퓨팅은 전통적인 초고속 컴퓨터로는 처리하기 어려운 다양한 계산 문제에 대해 파괴적인 새로운 방법을 제공하기 위한 주요한 후보이다. 그러나 Navier-Stokes 방정식과 같은 비선형 연속체 시스템에 대한 양자컴퓨팅 연구는 제대로 이루어지지 않고 있다. 이러한 시스템은 점성유체와 같이 고전 컴퓨터에서 해결하기 어려운 문제를 포함하고 있으며, 이러한 유체는 항공우주산업, 천문학, 수치기상 및 기후예측과 같은 분야에서 핵심적인 역할을 하는 Navier-Stokes 비선형 편미분 방정식에 의해 지배된다. 본 정책 연구는 Navier-Stokes 방정식을 해결하기 위한 양자컴퓨팅 알고리즘과 최적화를 연구하고, 수치기상 및 기후예측 문제를 해결하기 위한 전산유체역학에 대한 양자컴퓨팅의 적용 가능성을 평가하는 것이다. 이를 위해 양자컴퓨팅 알고리즘을 연구하고, Navier-Stokes 방정식을 해결하기 위한 양자컴퓨팅의 최적화 방법을 탐색한다. 만약 성공한다면, 이러한 연구는 수치기상 및 기후예측 문제 해결을 위한 양자컴퓨팅의 적용 가능성을 평가하는데 기여함과 동시에 파괴적인 사회경제적 영향을 가져올 수 있을 것이다. ■

“ 대기 이벤트의 소규모 스펙트럼 부분은 그리드 해결 가능 과정의 매개변수 통해 고려해야함 ”

## 1. 기존 수치기상 및 기후예측 모델의 한계

수치기상 및 기후예측(Numerical Weather Prediction, NWP) 모델들은 점성 유체의 얇은 구형 층의 움직임을 설명하는 Navier-Stokes (NS) 방정식의 이산 아날로그, 이상기체 법칙, 그리고 에너지와 수분의 보존 방정식에 기반을 두고 있다. 대기 변동성의 주요 원인은 비선형 상호작용의 결과로 인한 큰 규모와 작은 규모의 움직임으로 전파되는 유의 기상 과정에 의한 운동 에너지와 모멘텀의 생성이다. 현대 NWP 모델들은 몇 시간에서 수일까지의 기간을 포함하는 유의 기상 규모의 대기 과정을 적절히 모사하며, 이에는 저기압 발생(cyclogenesis)과 전선 발생(frontogenesis) 과정, 그리고 수십 분에서 몇 시간까지의 기간을 가지는 일부 중규모 과정이 포함된다(Frolov, 2017).

초기 방정식의 공간적·시간적 이산화로 인해 대기 이벤트의 소규모 스펙트럼 부분은 모델 그리드에서 명시적으로 시뮬레이션 할 수 없으며, 그리드를 해결 가능한 과정의 매개변수를 통해 고려해야 한다. 공간 해상도가 증가함에 따라 물리적 과정의 매개변수화를 사용할 필요가 없어지는데, 이는 모델 그리드에서 직접적인 수치모델링을 통해 시뮬레이션의 정확성을 높일 수 있게 되기 때문이다. 동시에, 그리드 간격이 계속 줄어들면 새로운 문제가 발생한다. 즉, 매개변수화된 과정의 규모가 그리드 셀의 크기와 비교할 수 있을 정도로 되고, 매개변수화에 사용된 가정이 더 이상 참이 아니게 된다. 이러한 수평 스케일 범위를 "그레이 존"이라고 한다(Shin and Hong, 2013).

급속하게 발달하는 깊은 대류 과정의 경우, 그레이 존은 통상적으로 수백 미터에서 10km까지의 스케일 범위 내에 있다. 그리드 간격은 그레이 존의 하한보다 몇 배 작아야 한다. 현재 그레이 존 내에서 그리드 해결 가능한 과정과 매개변수화된 물리적 과정 간 상호작용의 효과를 적절하게 고려하는 것은 우선 순위를 가진 NWP 작업 중 하나이다(Arakawa and Wu, 2013; Shin and Hong, 2013).

수평 그리드 간격이 두 배로 감소하면 그리드 포인트 수는 네 배로 증가하고, 계산 부담은 대략 여덟 배 증가한다. 따라서, 수평 해상도가 1km 미만인 현업 전지구 모델

“ 효율적인 양자 회로 설계는 양자 알고리즘 및 계산의 기본 ”

의 구현 알고리즘은 엑사플롭스(exaFLOPS)<sup>1)</sup> 컴퓨터가 필요하다. 또한, 변분 방법을 사용하여 NWP 모델의 초기장을 만드는 문제는 기상예보 보다 훨씬 높은 컴퓨팅 파워를 요구한다. 관측 데이터 편차의 최소치를 찾거나 NWP 모델 수치 해의 경사 하강 최적 방향을 확인하기 위해 전지구 모델이 사용되는 수십 번의 반복이 필요하다. 현재로서는 현업 앙상블 예보를 사용하여 공분산 행렬이 지정되는 하이브리드 방법이 NWP 초기화 시간을 줄이는 데 사용되고 있다(Brunet et al., 2015). 날씨, 기후, 환경 예측을 위한 대기, 바다, 활성 계층, 빙권의 접합 모델은 슈퍼컴퓨터의 엑사플롭스 및 제타플롭스(zettaFLOPS)<sup>2)</sup> 성능을 필요로 할 것이다.

## II. 양자컴퓨팅 기반의 전산유체역학

### 1. Navier-Stokes 방정식 해결을 위한 양자컴퓨팅 알고리즘

수치기상 및 기후예측모델의 핵심은 전산유체역학이다. 양자컴퓨팅은 복잡도가 증가하는 다양한 계산 문제를 처리하기 위한 새로운 파괴적(disruptive) 수단을 제공하는 유망한 후보이다. 그러나, 양자 계산이 점점 어려워지는 고전 비선형 시스템(예: 점성유체)의 양자컴퓨팅에 대한 선행 연구실적은 거의 없다(Gaitan, 2020; Gaitan, 2021; Givi et al., 2020). 이러한 유체는 Navier-Stokes 비선형 편미분 방정식(Partial Differential Equation, PDE)에 의해 기술되며 이 방정식의 해결은 항공우주산업, 기상예보, 천체물리학뿐만 아니라 냉장고나 에어컨 등 열순환 가전제품의 성능 최적화에도 중요하다.

따라서, 유동 문제의 해결을 위한 양자 알고리즘의 개발은 적용 가능한 응용 분야의 과학적·경제적 중요성을 고려할 때 중요한 과제이다. 이러한 양자 알고리즘은 양자 회로로 나타나며, 효율적인 양자 회로 설계는 양자 알고리즘 및 계산의 기본적인 문제이다. 왜냐하면, 작은 규모의 양자 회로를 구축하는 데도 많은 수의 기본

1) 엑사플롭스 = 초당  $10^{15}$ 의 부동 소수점 연산

2) 제타플롭스 = 초당  $10^{21}$ 의 부동 소수점 연산

“ 편미분 방정식의 이산화 접근은 상미분 방정식 시스템 해결에 중요 ”

양자 게이트가 필요하기 때문이다(Barenco et al., 1995). Navier-Stokes 편미분 방정식은 다음과 같이 기술된다:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{v^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \left( e + \frac{v^2}{2} \right) v_j \right] = -\frac{\partial}{\partial v_j}(v_j p) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (v_k \tilde{\tau}_{jk})$$

여기서는  $\rho(\vec{x}, t)$  유체의 밀도,  $T(\vec{x}, t)$ 는 온도,  $\vec{v}(\vec{x}, t)$ 는 유속,  $\tilde{\tau}_{ij}$ 는 Newtonian viscous stress tensor,  $\kappa$ 는 열전도율, 그리고  $e(\rho, T)$ 는 local internal energy이다.

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial x_1} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial x_2} + \frac{\partial \vec{C}}{\partial x_3} = \vec{J} \tag{2}$$

식(1)에서 기술한 3개의 NS 편미분 방정식은 식(2)처럼 한 개의 벡터 편미분 방정식으로 표현할 수 있다. 여기서  $\vec{U}$ 는 풀어야 할 미정 벡터,  $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$ 는 플럭스(flux) 벡터, 그리고  $\vec{J}$ 는 소스 벡터이다. 식(2)를 이산화(discretize)하기 위해 공간 벡터  $\vec{x}$ 를 m개의 그리드 포인트를 갖는 격자  $\vec{x}(\vec{I}) = (i_1 \Delta x_1, i_2 \Delta x_2, i_3 \Delta x_3)$ 로 표현된다. 여기서  $\vec{I} = (i_1, i_2, i_3)$ 는 정수값을 가지며 식(2)를 공간 변수에 대해 이산화시키면 다음과 같은 상미분 방정식(ODE, Ordinary Differential Equation)으로 변환시킬 수 있다. 이러한 접근 방식은 양자 알고리즘으로 비선형 ODE 시스템을 해결하는 것이 가능하기 때문에 중요하다(Kacewicz, 2006).

$$\frac{d\vec{U}(\vec{I}, t)}{dt} = \vec{f}[\vec{U}(\vec{I}, t)] \tag{3}$$

비선형 상미분 방정식(3)은 양자 진폭 추정 알고리즘(Quantum Amplitude Estimation Algorithm, QAEA) (Brassard et al., 2002)을 이용하여 풀 수 있으며, 이러한 방법은 Non-smooth class drive function에 대한 양자 계산이 고전적인 결정론적 알고리즘과 비교하면 지수적인 속도 향상을 기대할 수 있다는 장점을 가질 수 있다. 이를 위한 수학적 접근 방법은 다음과 같다:

“ QMC를  
양자컴퓨터로  
계산하기 위해  
필요한 알고리즘이  
QAEA ”

$$\vec{U}(\vec{I}, t_{i+1}) = \vec{U}(\vec{I}, t_i) + \sum_{j=0}^{N_k-1} \int_{t_{i,j}}^{t_{i,j+1}} d\tau f[\vec{A}_{i,j}(\vec{I}, \tau)] + \sum_{j=0}^{N_k-1} \int_{t_{i,j}}^{t_{i,j+1}} d\tau [f[\vec{U}(\vec{I}, \tau)] - f[\vec{A}_{i,j}(\vec{I}, \tau)]] \quad (4)$$

$$E[f(\vec{X}_i)] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f(\vec{X}_i) \quad (5)$$

식(4)의 두 번째 항을 적분하는 과정에서 Quantum Monte Carlo가 사용되며 이는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\vec{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 은 random variable로 표시되는 변수들의 집합이며,  $\{\vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_M\}$ 은 M개의 함수 f에 대한 random path로 각각의 경로는 stochastic process에 대응하는 확률밀도 함수에 의해 기술될 수 있다. 식(5)를 양자컴퓨터로 계산하기 위해 필요한 알고리즘이 QAEA이다.

고전적인 Monte Carlo 방법은 볼츠만 운동 방정식을 계산적으로 해결하는 데에도 활용되고 있으며, rarefied 가스 유동 문제를 비롯한 다양한 과학적기술적 문제 해결을 위해 일반적으로 적용되고 있다. 그러나 Monte Carlo 방법은 특히 연속체 근접 규제와 3차원 유동 문제에서 매우 높은 계산 비용을 요구하는 단점이 있다. Monte Carlo에서 계산 도메인은 지역 평균 자유 경로보다 작은 크기의 셀로 이산화되며, 시간은 평균 충돌 시간의 일부로 선택된다. 대표 입자의 운동은 직선적 궤도로 처리되고 분자 간 충돌은 확률적 방식으로 처리된다. 이 과정은 유동이 안정 상태에 도달할 때까지 반복된다. 안정 상태에 도달한 후에는 통계적으로 평균화된 거대한 양을 얻기 위해 샘플링 프로세스가 재개되며 이러한 과정에서 많은 양의 계산 시간이 무작위 숫자 생성 작업에 소요된다.

〈표 1〉은 이러한 QAEA 기반의 연산에 대한 resource estimation을 quantum, classical random, classical deterministic 컴퓨팅 경우로 나누어 보여준다. 이 결과는 NS 미분 방정식 해결의 computational 비용을 이론적으로 구한 것이다(Gaitan, 2021). 여기서  $\epsilon$ 는 근사해의 error tolerance,  $q = r + \rho$ 는 smoothness parameter,  $r$ 은 테일러 급수에서 취할 가장 고차항의 미분, 그리고,  $0 \leq \rho \leq 1$ ,  $0 \leq \gamma < 1$ 이다.

“ QAEA는 양자 푸리에 변환과 Grover 알고리즘으로 구성 ”

〈표 1〉 경QAEA 기반의 연산에 대한 resource estimation1

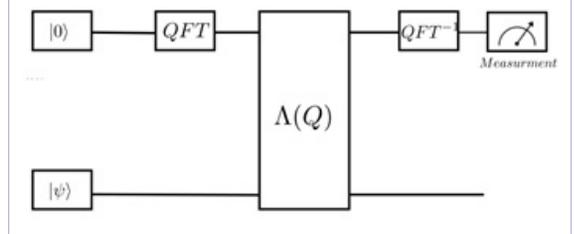
Bounds	Quantum	Classical Random	Classical Deterministic
Upper	$O[(1/\epsilon)^{1/(q+1-\gamma)}]$	$O[(1/\epsilon)^{1/(q+1/2-\gamma)}]$	$O[(1/\epsilon)^{1/q}]$
Lower	$\Omega[(1/\epsilon)^{1/(q+1)}]$	$\Omega[(1/\epsilon)^{1/(q+1/2)}]$	$\Omega[(1/\epsilon)^{1/q}]$

〈표 1〉은 양자컴퓨터의 지수값이 고전 컴퓨터의 지수 값보다 작다는 것에서 quantum speedup을 이론적으로 보여준다.

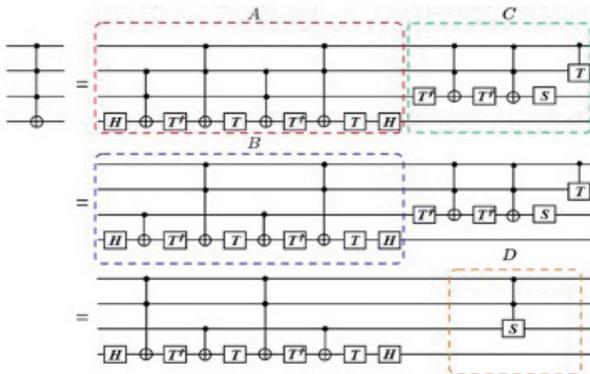
## 2. Quantum Amplitude Estimation을 위한 양자푸리에 변환 구현

QAEA의 기본 구성은 [그림 1]과 같이 양자푸리에 변환(Quantum Fourier Transform: QFT)과 Grover 알고리즘(Q)으로 구성되어 있다(Brassard, 2002). 이 중에서 우리는 먼저 양자푸리에 변환을 구현하기 위한 연구를 진행하였다. 이를 위해 먼저 양자 카르노 맵을 이용해 양자 회로를 구성하는 기본 게이트 중의 하나인 4-큐비트 게이트를 최적화하는 작업을 수행하였다. 4-큐비트 토폴리 게이트의 경우 16개의 3중 큐비트 게이트 혹은 106개의 기본 게이트가 필요한 통상적인 표현에서 11개의 3중

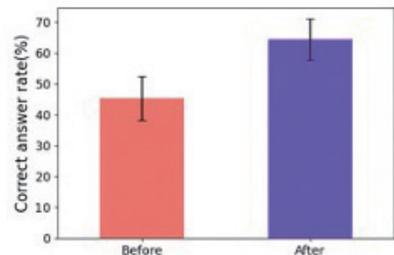
[그림 1] QAEA의 구성



[그림 2] 4-큐비트 토폴리 게이트에 대한 QKM 적용 및 IonQ 양자컴퓨터에 의한 검증

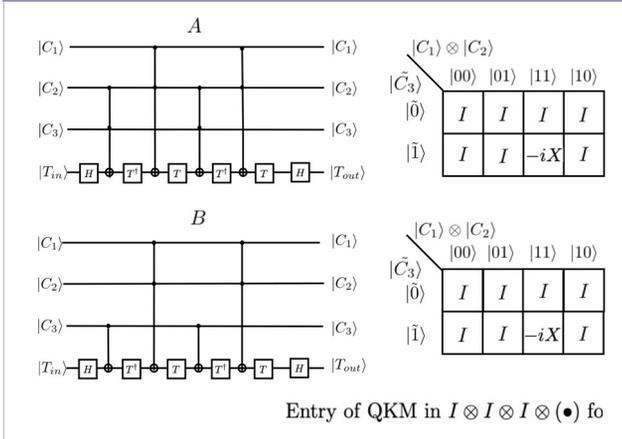


□ 기본 4-큐비트 토폴리 게이트는 106개의 기본 게이트로 구성되어 있고, 양자 카르노 맵을 이용하면 이를 45개의 게이트로 줄일 수 있다. (60% 감소)



□ 4-큐비트 토폴리 게이트 IonQ 실험 결과 (1) QKM 적용 전 (2) QKM 적용 후

[그림 3]  $C^2(X)$  게이트를  $C^1(X)$  게이트로 변환(좌), 해당 회로의 양자 카르노 맵(우)



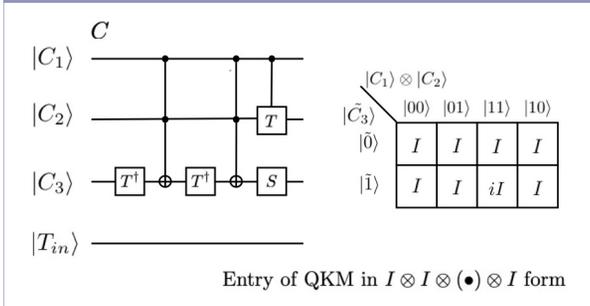
게이트 혹은 45개의 기본 게이트를 가진 회로로 축소할 수 있음을 보였다(Bae et al., 2020).

[그림 2]는 양자 암호키 관리장치(Quantum Key Management QKM)를 사용하여 양자 회로의 기본 요소 중의 하나인 4-큐비트 토폴리 게이트의 간소화를 이론적으로 실행하고 IonQ 양자컴퓨터를 사용하여 실험적으로 검증한 결과를 보여준다.

[그림 2]의 왼쪽 결과를 더 자세히 살펴보자면, M-큐비트 토폴리 게이트를  $C^m(X)$ 라고 정의할 때 부분회로 A에서 부분회로 B로의 변환은 [그림 3]과

같이  $C^2(X)$  게이트의 절반을  $C^1(X)$  바꾼 것이다. 부분회로 C에서 D로의 변환 역시 [그림 4]와 같이 양자 카르노 맵으로 증명이 가능하다.

[그림 4] 부분회로 C(좌), 해당 회로의 양자 카르노 맵(우)

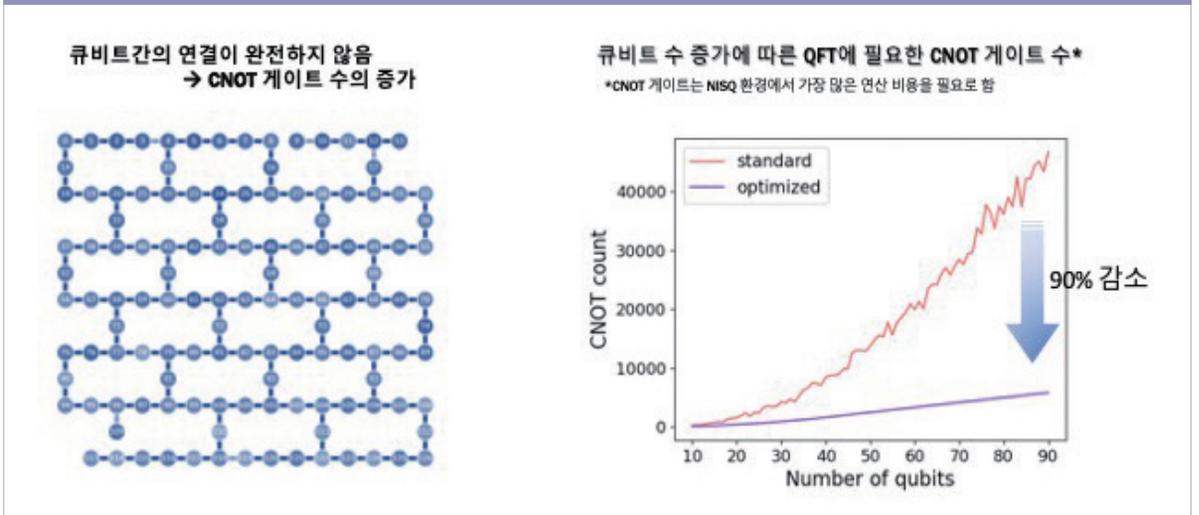


양자 카르노 맵은 NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum) 환경에서 가장 많은 resource를 요구하는 CNOT(Controlled NOT) 게이트의 개수를 줄이는 데 활용이 가능하다. [그림 5]는 IBM의 양자 컴퓨터 중 Washington 머신에서 양자 푸리에 변환(Quantum Fourier Transform, QFT)의 emulation 결과이다. 해당 결과에 의하면 큐비트 수가 증가할수록

QKM이 더 큰 효율을 보이는 것을 알 수 있다(Park and Ahn, 2023).

Park과 Ahn(2023)의 논문은 양자 회로 최적화로 실제 양자 컴퓨터 상에서 회로를 실행시킬 때 요구되는 CNOT 게이트 연산의 개수를 줄이는 것을 목표로 하였다. 이 과정은 IBM, Rigetti 양자 컴퓨터의 큐비트 간 연결성을 고려한 큐비트 매칭과 QKM 등의 회로 최적화 기법을 이용한 추가적인 회로 최적화 가능성 조사를 포함한다. 또 다른 유망한 큐비트 구현 방식에는 IonQ 등에서 사용하는 포획 이온(trapped ion) 큐비트를 이용한 방식이 있다. IonQ 양자 컴퓨터는 큐비트 간의 연결성이 완전하

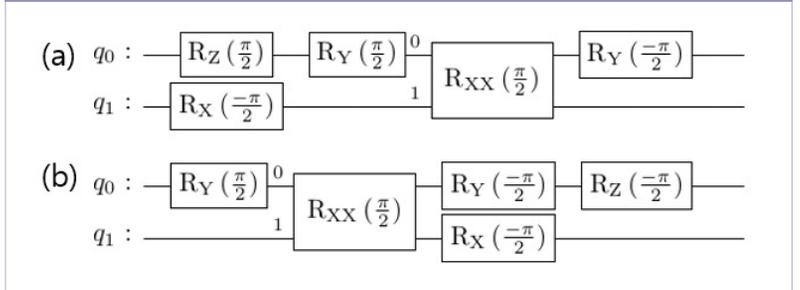
[그림 5] 양자 카르노 맵을 이용한 양자 푸리에 변환의 CNOT 게이트 개수 최적화 연구 결과(Park and Ahn, 2023)



다는 장점이 있다. 그러므로 유사한 expressibility를 가지는 ansatz 회로를 적은 수의 2 큐비트 게이트들을 이용해 구성할 수 있을 것이라 기대할 수 있을 것이다[그림 6].

IonQ의 native 2 큐비트 게이트는 CNOT 게이트가 아닌 XX 게이트 등이다. 본 연구를 통해 XX 게

[그림 6] CNOT 게이트와 relative phase CNOT 게이트 분해. (a) 알려진 CNOT 게이트 분해(Maslov, 2016), (b) 선행 연구를 통해 개발한 relative phase를 가지는 CNOT 게이트 분해

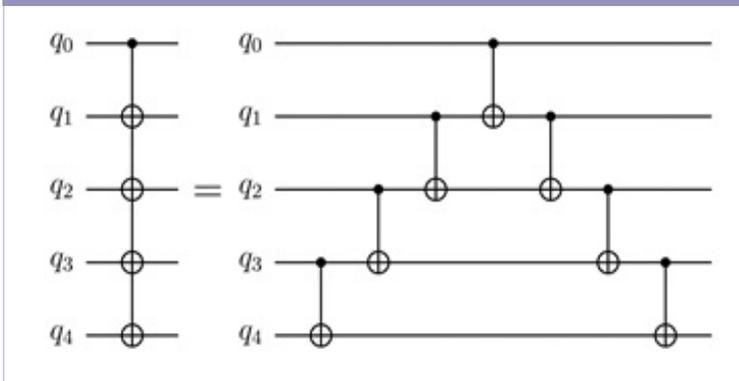


이트 등으로 ansatz의 entanglement layer를 형성하였을 때의 이점, 특히 사용하는 2 큐비트 게이트 개수 대비 expressibility에 대해 조사하였다. 또한 양자 푸리에 변환을 IonQ 양자 컴퓨터의 native 게이트로 옮길 때 선행 연구를 통해 개발한 relative phase CNOT 게이트 등의 활용 방안을 조사하였다. Relative phase CNOT 게이트는 relative phase 토폴리 게이트(Maslov, 2016)를 정의할 때와 마찬가지로, CNOT 게이트를 computational basis를 이용해 행렬로 표시할 때 1이 위치하는 자리에 임의의 phase를 가지고 크기가 1인 복소수를 가지는 게이트로 정의할 수 있다.

“ 양자 컴퓨팅 기반  
NWP의 수혜자는  
기상예보  
사용자 ”

큐비트 간 연결성이 완전하여 nearest neighbor 구조를 고려하지 않아도 되는 IonQ와 같은 양자 컴퓨터 상에서의 효율적인 ansatz 설계를 위한 연구를 진행하였다. 이 연구는 nearest neighbor 구조를 고려하지 않았을 때, 유사한 큐비트 수와 파라미터 수에서 유사한 수준의 expressibility를 가지지만 더 적은 회로 비용을

[그림 7] 선행 연구를 통해 개발한 linear nearest neighbor 구조 FAN OUT 게이트(Park and Ahn, 2023)



가지는 회로를 개발하는 연구를 포함한다. 추가적으로 본 연구를 통해 개발된 non nearest neighbor 구조 양자 푸리에 변환의 ansatz 회로를 linear nearest neighbor 구조로 구현하였다[그림 7]. 이 연구는 선행 연구(Park and Ahn, 2023)를 통해 개발된 회로 최적화 기법의 활용과 추가적인 기법들의 개발을 포함하고 있다.

### III. 맺음말

지금까지 수치기상 및 기후예측을 위한 계산 모델을 개발하는 데 상당한 진전이 이루어졌다. 그러나 수치 기상 및 기후예측에서는 고전 컴퓨터, 슈퍼컴퓨터가 갖는 한계가 분명하다. 특히, 고전 컴퓨터에 의한 기후 데이터 분석 과정은 빠르게 변하는 기상 조건을 따라잡기에 충분히 빠르지 않을 수 있다. 양자 컴퓨팅 기반 NWP의 잠재적 수혜자는 기상예보의 사용자 또는 잠재 사용자이며, 따라서 기상예보시스템의 참여자인 개인이나 조직의 대표자가 될 수 있다. 수혜자와의 네트워킹은 주로 연구 결과를 이해관계자 네트워크를 포함한 대중에게 전파함으로써 이루어질 것이다. 주요 결과는 저널 논문의 출판과 함께 초음속 흐름, 난류, 유체역학, 자기유체역학, 대기과학, 산불 예방에 종사하는 과학자와 엔지니어들을 대상으로 한 온라인 및 오프라인 워크숍을 통해 전파될 것이다.

“ 최적화와 오류 경감을 통해 성공적인 예보 제공이 가능할 것 ”

양자 알고리즘과 양자 컴퓨팅의 최적화 방식은 특히 노이즈가 있는 중간 양자 계산 영역(NISQ)에서, 특히나 Navier-Stokes 방정식에서 매우 중요하다. 우리는 Navier-Stokes 방정식에 대해 최적화된 양자 알고리즘을 구현하기 위해 Python 기반 코드와 오픈소스 도구를 개발할 것을 제안한다. 비선형 유체 동역학 방정식에 대한 양자 컴퓨팅 알고리즘의 성공적인 개발은 수치해석 기반의 기상 및 기후예측 문제를 해결하기 위한 과학기술적인 관점에서 모두 극히 중요할 것이다. 잠재적인 어려움은 현재 잡음이 많은 양자 컴퓨터에 누적된 오류와 그로 인한 기술적 불확실성에서 비롯될 수 있으며, 이는 수치적 기후예측을 위한 비선형 유체 부분 미분 방정식을 해결하는 문제에 적용될 것이다. 이러한 위험을 완화시키기 위한 전략은 최적화를 통해 양자 알고리즘의 복잡성을 줄이는 것과 양자 오류 경감을 통해 양자 컴퓨팅의 신뢰도를 높이는 것이다. 만약 성공한다면, 우리는 재앙적인 사건과 파괴의 영향을 최소화하기 위한 예보 정보를 성공적으로 제공할 수 있을 것이다.

본 연구는 과학기술정보통신부의 연구비 NRF-2023R1A2C1003570, RS-2023-00225385, 미국공군 (US Air Force)의 연구비 AFOSR Grant FA2386-21-1-0089, AFOSR Grant FA2386-22-1-4052, 그리고 Amazon Web Services의 지원을 받았다. 또한 IBM Quantum services의 지원을 받았다. 이 논문의 관점은 오로지 저자의 것이며 IBM 이나 IBM Quantum team의 관점이 아님을 밝혀둔다.

### 참고문헌

- Arakawa, A., and Wu, C.-M., 2013: A unified representation of deep moist convection in numerical modeling of the atmosphere. Part I. J. Atmos. Sci., 70, 1977-1992.
- Bae, J., Alsing, P. M., Ahn, D., and Miller, W. A., 2020: Quantum Circuit Optimization Using Quantum Karanagh Map, Scientific Reports, 10, 15651.
- Barenco, A., Bennett, C. H., Cleve, R., DiVincenzo, D. P., Margolus, N., Shor, P., Sleator, T., Smolin, J. A., and Weinfurter, H., 1995: Elementary Gates for Quantum Computation, Physical Review A, 52, 3457-3467.
- Brassard, G., Hoyer, P., Mosca, M., and Tapp, A., 2002: Quantum Amplitude Amplification and Estimation, Contemporary Mathematics, 305, 53.
- Brunet, G., Jones, S., and Ruti, P., 2015: Seamless prediction of Earth system. From Minutes to Months, WMO, 1156.

- Frolov, A. V., 2017: Can a quantum computer be applied for numerical weather prediction? *Russian Metro. Hydro.*, 42, 545-553.
- Gaitan, F., 2021: Finding Solutions of the Navier-Stokes Equations through Quantum Computing—Recent Progress, a Generalization, and Next Steps Forward, *Advanced Quantum Technologies*, 4, 2100055.
- Gaitan, F., 2020: Finding Flows of a Navier-Stokes Fluid through Quantum Computing, *npj Quantum Information*, 6, 61.
- Givi, P., Daley, A., Mavriplis, J. D., and Malik, M., 2020: Quantum Speedup for Aerospace and Engineering, *AIAA Journal*, 58, 3715-3727.
- Kacewicz, B., 2006: Almost Optimal Solution of Initial-Value Problems by Randomized and Quantum Algorithms, *Journal of Complexity*, 22, 676-690.
- Maslov, D., 2016: Advantages of Using Relative-Phase Toffoli Gates with an Application to Multiple Control Toffoli Optimization, *Physical Review A*, 93, 022311.
- Park, B., and Ahn, D., 2023: Reducing CNOT count in quantum Fourier transform with linear nearest-neighbor architecture, *Sci. Reports*, 13, 8638.
- Shin, H. H., and Hong, S.-Y., 2013: Analysis of resolved and parameterized vertical transports in convective boundary layers at grey-zone resolution. *J. Atmos. Sci.*, 70, 3248-3261.

# 미국 해양대기청(NOAA)의 예산구조 분석

김득갑 연세대학교 동서문제연구원 객원교수 europe726@yonsei.ac.kr



- Ⅰ. 글로벌 기후변화로 인한 기상재해의 증가
- Ⅱ. 미국과 한국의 기상 관련 예산 비교
- Ⅲ. 정책적 시사점

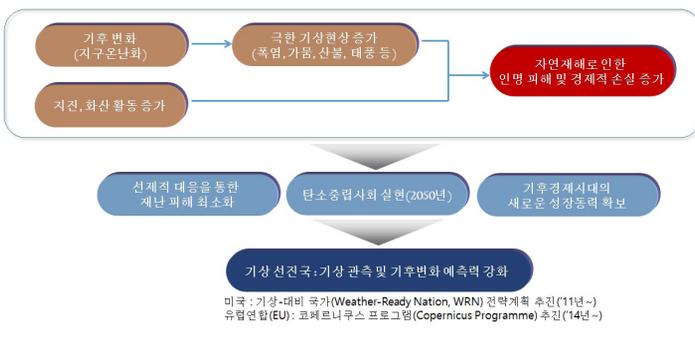
기후변화로 인한 극한기상 현상으로 기상재해가 매년 증가하고 있다. 갈수록 중요해지는 기상청의 역할에 비해 예산은 미미한 수준이다. 기상선진국 미국은 '11년부터 기상-대비 국가(Weather-Ready Nation, WRN) 전략을 추진해왔다. 미 해양대기청(NOAA)의 '23년 예산은 68.8억 달러(한화 8.9조 원)에 달한다. 기상청의 업무는 NOAA 산하의 기상청(NWS), 환경위성데이터정보국(NESDIS), 해양대기연구소(OAR), 해양청(NOS)이 나누어 수행하고 있다. 기상청과 NOAA 산하 4개 기관의 예산구조를 분석한 결과 미국의 기상 관련 예산은 48.6억 달러로 기상청 예산의 13.4배 규모에 이른다. 국민 1인당 기상정보 생산에 투입된 예산을 비교해보면 '23년 우리나라는 9,078원의 예산을 편성한 반면 미국은 우리의 2.1배에 달하는 19,029원의 예산을 책정하고 있다. 기후변화로 인한 기상재해 증가와 기후경제시대에 대비한 투자 필요성 등을 감안한다면 기상청의 역할 강화와 이를 위한 지속적인 예산 확대가 요구된다. 기상청은 WRN 실현, 지역 형평성 고려, 블루이코노미 성장 지원 등 NOAA의 정책 방향을 예산 확대의 근거자료로 활용할 필요가 있다. ■

## 1. 글로벌 기후변화로 인한 기상재해의 증가

글로벌 기후변화로 인해 폭염, 가뭄, 집중호우 등 극한기상 현상의 강도와 빈도, 지속시간이 갈수록 증가하고 있다. 이로 인해 전 세계적으로 인명 피해와 사회·경제적 손실이 급격히 심화되고 있다. 미국은 2022년에 역사상 세 번째로 높은 고온을 기록했으며, 미국 국토의 40% 이상이 119주 연속(역대 최장기) 심각한 가뭄을 겪었다. 이로 인해 미국에서는 2022년 1,650억 달러의 재난비용이 발생한 것으로 집계되고 있다. 유럽연합(EU)의 경우 2022년에 유럽 대륙의 2/3가 500년 만의 가뭄을 겪었으며, 기후변화로 인해 지난 10년간 1,450억 유로의 경제적 손실이 발생하였다. 독일은 가뭄과 폭염으로 라인강 수위가 급격히 내려가면서 하루 6,900척의 선박 운항과 1,000만 톤 화물 물동량이 1/4 수준까지 급감하는 등 심각한 물류대란을 겪어야만 했다.

미국, EU 등 기상선진국들은 갈수록 늘어나는 기상재해로 인한 인명 피해와 경제적 손실을 최소화하는 한편, 2050년 탄소중립사회 실현을 앞당기고 기후경제시대의 새로운 성장 동력 확보 차원에서 기상관측 및 기후변화 대응을 위한 투자를 확대하고 있다. 미국은 2011년부터 기상-대비 국가(Weather-Ready Nation, WRN) 전략계획을 추진해왔으며, EU도 2014년부터 기상관측 역량을 강화하기 위해 범유럽 차원에서 코페르니쿠스 프로그램(Copernicus Program)을 추진하고 있다.

[그림 1] 기상선진국들의 기후위기 대응을 위한 기상 관련 정책



우리나라도 기후위기에서 예외는 아니어서 폭염·폭우·홍수가뭄 등 기상이변이 갈수록 증가하고 있다. 이로 인한 기상재해 피해가 최근 10년간(2010-2019년) 평균 3배 증가하였다. 재해성 기상 현상의 증가는 지구온난화로 인한 기후변화가 근본 원인으로 지목되고 있다. 우리가 매년 경험하고 있는 봄

철의 산불 피해도 기후변화로 인한 메마른 지면 생물체와 건조한 토양 때문이라는 지적이 나온다. 기상이변 현상은 지구 대기권은 물론 육지, 해양 등에서의 다양한 요인들에 의해 나타나는 복합적인 현상이어서 예측하기가 갈수록 어려워지고 있다. 기후변화로 인한 극한기상 현상에 대응하기 위해서는 보다 활발한 학제적 연구와 과감한 투자가 필요하다[그림 1].



기후위기 심화와 기상선진국의 정책 추이 등을 고려할 때 기후위기 감시·예측 총괄, 지원기관으로서 우리나라 기상청(이하 '기상청')의 역할은 더욱 확대·강화될 필요가 있다. 하지만 최근 5년간(2019-2023년) 정부예산이 36.1% 증가하는 동안 기상청 예산은 21% 증가하는데 그쳤다. 기상청 예산은 산림청, 농촌진흥청, 특허청 등 다른 외청의 예산과는 큰 격차를 보이고 있다(표 1).

(단위: 백만 원)

〈표 1〉 디지털 기술과 양자 기술의 비교(투이컨설팅, 2018)

연도	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년	5년간 증가율
정부총예산	469,575,177	512,250,448	557,987,188	607,663,263	639,000,000	36.1%
환경부	7,849,650	9,539,340	11,171,451	11,852,915	13,720,000	74.8%
산림청	2,124,006	2,225,758	2,528,186	2,390,289	2,784,200	31.1%
농촌진흥청	940,500	1,024,900	1,087,700	1,189,300	1,254,700	33.4%
특허청	444,232	498,819	525,264	547,445	739,000	66.4%
기상청	388,191	390,920	425,659	453,682	469,700	21.0%
소방청	219,720	201,134	220,761	242,563	308,800	40.5%

기상청의 2023년 예산은 전년대비 3.5% 증가한 4,697억 원으로 정부 전체 예산의 0.074%에 불과한 실정이다. 기상청의 최근 10년간 예산 추이를 살펴보면 정부예산 내 비중이 2016년 한 때 0.104%까지 상승한 적이 있었으나, 이후 비중이 계속 낮아져 2023년에는 0.074%로 최저치를 기록하였다(표 2).

(단위: 십억 원)

〈표 2〉 최근 10년간 우리나라 정부 전체 및 기상청 예산 추이

구분	2014년	2015년	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년	10년간 증가율
정부	355,805	375,403	386,400	400,546	428,834	469,575	512,250	557,987	607,663	639,000	79.6%
기상청	349.0	385.7	402.1	385.3	397.9	388.2	390.9	425.7	453.7	469.7	34.6%
기상청 비중	0.098%	0.103%	0.104%	0.096%	0.093%	0.083%	0.076%	0.076%	0.075%	0.074%	-

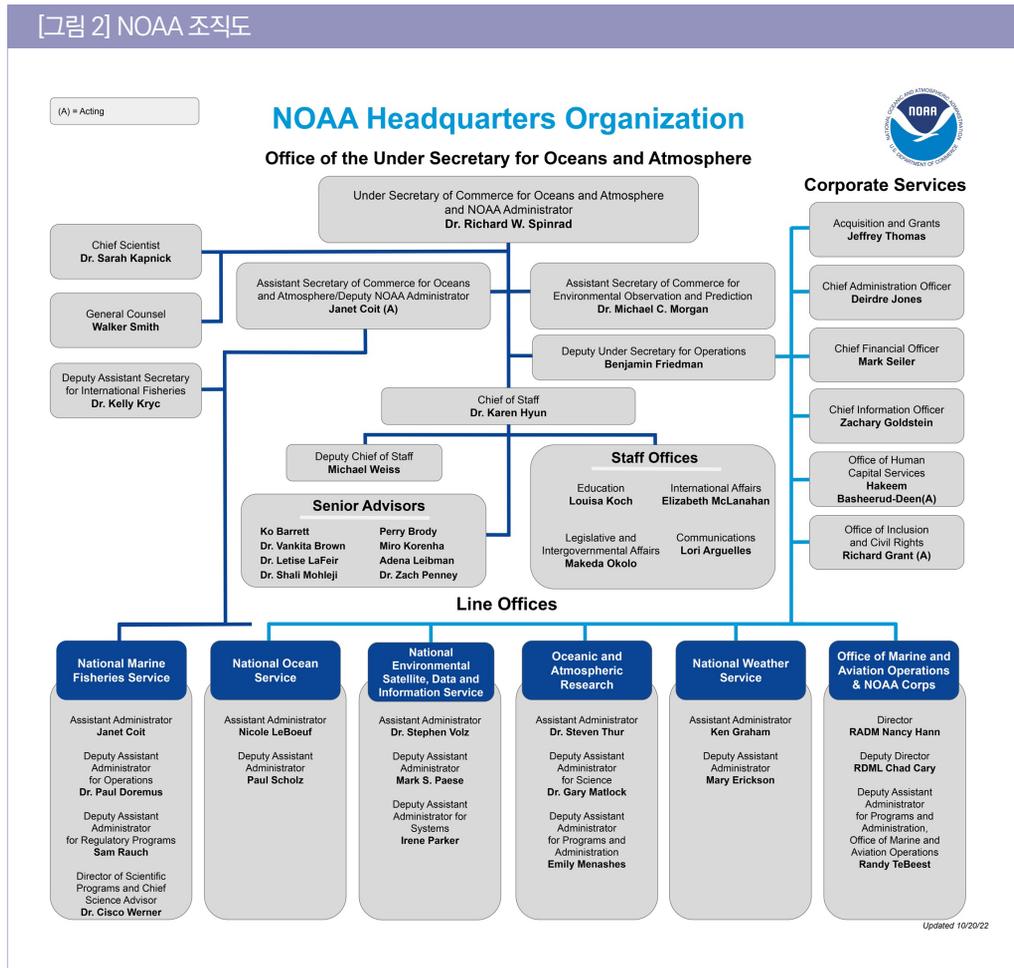
현재 기상청 예산 규모의 적정성과 관련하여 다양한 견해가 존재하고 있다. 기상선진국인 미국 NWS(National Weather Service) 예산과 기상청 예산을 비교하면 경제규모 대비 그리 적지 않다는 견해가 있는 반면, 기상청과 비슷한 역할을 수행하는 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)와 비교할 경우 턱없이 적다는 견해가 팽팽히 맞서 있다. 따라서 어느 주장이 보다 설득력을 갖는지를 살펴보기 위해 NOAA의 조직구조 및 역할과 산하기관들의 예산구조를 분석할 필요가 있다.

## II. 미국과 한국의 기상 관련 예산 비교

### 1. NOAA의 기상 관련 예산

NOAA는 상무부 소속기관으로 기상·기후·해양 및 해안 변화 예측, 데이터와 정보 제공, 해안 및 해양 생태계와 자원 보존 및 관리 역할을 수행하고 있다. NOAA의 6개 산하기관 중에서 4개 기관이 기상 관련 업무를 수행하는 것으로 파악된다. 이 중 NWS는 기상, 물, 기후와 관련한 관측 및 예측을 바탕으로 영향 기반 의사결정 지원서비스(Impact-Based Decision Support Services, IDSS)를 제공함으로써 생명과 재산을 보호하고 국가 경제에 기여하는 역할을 담당하고 있다. NESDIS(National Environmental Satellite Data and Information Service)는 다수

[그림 2] NOAA 조직도





의 환경위성을 운영하면서 다양한 기상-기후데이터를 수집, 모델링하여 예측력을 높임으로써 기후변화로부터 환경, 경제 및 삶의 질을 촉진하고 보호하는 역할을 수행하고 있다. OAR(Oceanic and Atmospheric Research)은 NOAA의 중앙연구기관으로 의사결정에 필요한 과학적인 정보를 제공하기 위해 다양한 분야의 연구와 기술개발을 수행하고 있다. NOS(National Ocean Service)는 해양, 해안, 오대호의 기상 및 기후변화를 관측하고 생태계와 경제, 사회적 영향을 해결하기 위한 솔루션을 제공하고 있다(그림 2).

NOAA의 2023년 예산은 68.8억 달러(한화 8조 9,494억 원)로 2021년 대비 22.5억 달러 증가하였다. NOAA 예산은 상무부 예산의 58.8%, 미국 연방정부 전체 예산의 0.44%를 차지하고 있다. 2023년 NOAA 예산의 특징은 '기상-대비 국가(WRN)'계획을 위한 기후 관련 기술 및 서비스 개발 관련 예산 확대, 극한 기상재해 및 기후변화 영향에 대한 예측력 향상을 위한 시스템 업그레이드 투자, 블루이코노미(Blue Economy)를 지원하기 위한 예산 증액 등으로 요약된다. NOAA의 2023년 예산은 다음과 같은 핵심 내용을 담고 있다.

첫째, 기후변화에 대한 이해의 공유와 조치를 통해 번영, 건강, 안전 및 지속적인 성장을 실현하고자 하는 '기상-대비 국가(WRN)'계획을 위해 기후 관련 기술과 서비스 개발에 3.5억 달러(한화 4,555억 원)를 배정하였다.

둘째, 극단적인 기상재해 및 기후 관련 영향에 대한 예측을 개선하기 위해 기존 시스템을 통합하고 정보전달체계를 개선하기 위한 통합확산프로그램(Integrated Dissemination Program, IDP)에 25백만 달러(한화 325억 원)를 배정하고, 기상재해 현상들을 관측하는 시설 운영을 위해 27백만 달러(한화 351억 원)를 증액하였다.

셋째, NOAA는 어업, 운송, 해운, 재생에너지 등에서 새로운 비즈니스를 창출하는 블루이코노미를 지원하기 위해 2.1억 달러(한화 2,762억 원)를 배정하였다. 바이든 정부의 블루이코노미 정책은 해상풍력과 태양광 등 신재생에너지의 개발 및 사용을 통해 탄소중립 촉진 및 경제 활성화를 도모하는 것이 핵심이다. 미 행정부는 '2030년 해상풍력 에너지 30GW 생산'목표를 달성하기 위해 해상풍력에너지 개발을 계획하고 풍력단지 설치를 위한 사회 및 생태학의 개발 지원에 45백만 달러(한화 590억 원)를 배정하였다.

넷째, NOAA는 2040년까지 현재 NEXRAD 레이더 네트워크를 대체하는 차세대 위상 배열 레이더의 성능을 평가하기 위해 46백만 달러(한화 602억 원)를 증액하였다. 또한 민간위성 분야

의 우주시스템 관측 능력을 개발하기 위해 OSC(Office of Space Commerce)에 78백만 달러(한화 1,010억 원)를 증액하였다.

NOAA 산하 4개 기관의 2023년 기상 관련 예산은 금액 면에서 NESDIS > NWS > OAR > NOS의 순으로 배정되어 있다. NWS는 WRN실현에 필요한 기상 정보와 서비스를 제공하기 위해 NOAA 예산의 19.2%에 해당되는 13.2억 달러(한화 1조 7,204억 원)를 배정받았다. 이 가운데 기상이보 분석 및 지원에 전체 예산의 44.1%, 기상관측에 2.5억 달러를 편성해 놓고 있다.

OAR은 6개 프로그램과 10개 연구소(Laboratories)를 통해 학제간 연구를 강화하여 과학적 결과를 의사결정에 활용하고자 예산을 편성하고 있다. OAR의 연구영역은 기후연구, 기상 및 대기 연구, 해양/연안/오대호 연구, 혁신연구 및 기술 등 4개 분야로 구성되어 있으며, 2023년 예산은 7.7억 달러(한화 1조 72억 원)에 이른다. 기후연구 분야에 OAR 예산 중 33%로 가장 많은 2.6억 달러가 배정되어 있으며, 기상 및 대기 연구 분야에는 최근 3년 동안 1.3배 증가한 1.5억 달러, 해양/연안/오대호 연구 분야에는 최근 3년 동안 약 2배 증가한 2.4억 달러(한화 3,076억 원)가 배정되어 있다.

NESDIS는 갈수록 예측하기 어려워지는 기상과 기후변화로부터 사람과 재산을 보호하기 위해 기후변화의 영향을 보다 정확히 예측할 수 있도록 차세대 위성과 지구시스템 모델링 개발에 많은 예산을 투입하고 있다. LEO(Low Earth Orbit), GEO(GEostationary Orbit), SWO(Space Weather Observation), CGS(Common Ground Services) 등을 통해 실시간으로 수집한 광범위한 관측 자료를 활용하고 있다. 2023년 예산은 2021년 대비 51.8% 증가한 22.8억 달러(한화 2조 9,678억 원)가 책정되었다. 이 가운데 NESDIS는 차세대 위성 개발 및 위성시스템 구입을 위해 18.7억 달러(한화 2조 4,360억 원)의 예비비(Discretionary PAC)를 편성해 놓고 있다. 이는 대부분 신규위성 개발 및 위성시스템 구입을 위한 자금으로 GEO 9.6억 달러, LEO 4.4억 달러, SWO 2.9억 달러, CGS 1.5억 달러 등에 예비비가 마련되어 있다.

NOS는 기후변화로 인해 극한기상 현상에 노출되어 있는 해양과 해안, 오대호 지역의 기상 관측, 생태계 변화 연구 등을 통해 해양 및 해안 자원의 지속가능한 관리 및 보호, 복원 활동을 수행하고 있다. 해안 및 오대호 카운티는 미국 육지 면적의 10% 미만에 불과하지만, 전체 인구의 40% 이상이 거주하고 있으며 경제활동이 집중되어 있다. NOS는 블루이코노미 육성을 위해 기후변화, 해수면 상승 및 연안 범람, 유해한 녹조, 극한 자연현상 및 생태계 변화에 대한 이해, 연안



재해 예측 및 대응을 위한 데이터, 관측, 모델링, 교육서비스 등을 제공하고 있다. NOS의 2023년 예산은 7.2억 달러(9,358억 원)가 책정되었다.

## 2. 우리나라 기상청의 예산

기상청은 1990년 12월에 청으로 승격되었고, 2005년 7월 차관급 중앙행정기관으로 격상되었다. 2008년 2월에는 환경부 외청으로 소속이 변경되었다. 기상청은 2023년 정책목표로 '위험기상과 기후위기로부터 안전한 국민, 든든한 국가'를 설정하고 이를 위해 4대 주요 업무를 추진하고 있다(그림 3).

2023년 기상청의 총예산은 전년대비 3.5% 증가한 4,697억 원으로 책정되었다. 인건비가 전체 예산의 22.9%를 차지하고 있으며, R&D 예산은 23.3%, 정보화사업 예산은 16.2%를 차지하고 있다. R&D 예산은 20개 세부사업으로 전년대비 15억 원 삭감된 1,095억 원이며, 정보화사업 예산은 11개 사업에 전년대비 11억 증가한 762억 원이 책정되었다(표 3).

[그림 3] 기상청의 2023년 정책목표

**2023년 정책목표**

**위험기상과 기후위기로부터 안전한 국민, 든든한 국가**

**1 위험기상·지진으로부터 더욱 안전한 사회**

가. 위험기상 대응 및 전달·소통 체계 강화  
 나. 기후위기 시대에 맞는 예·특보 체계로의 전환 추진  
 다. 한반도 3차원 위험기상 감시·관측체계 고도화  
 라. 수요자 중심 지진 정보 제공으로 체계 전환 추진

**2 신뢰도 높은 기후·기후변화정보로 탄소중립 지원**

가. 기후위기 종합 감시 및 분석 역량 강화  
 나. 과학적인 기후변화 예측정보 제공 확대  
 다. 기후위기 대응을 위한 물관리 맞춤형 서비스 강화

**3 미래도약을 위한 초격차 기상기후기술 확보**

가. 미래 기상기후기술 도약을 위한 원천기술 확보  
 나. 미래 환경변화에 대비한 기상융합기술 개발

**4 지속 성장을 위한 기상기후 생태계 조성**

가. 기상산업 경쟁력 강화를 위한 기반 마련  
 나. 기상기후 미래인재 양성 및 국제사회 위상 강화

(단위: 백만 원)

〈표 3〉 기상청의 2023년 세출예산 확정액

구분	2022년 예산		2023년 예산		전년대비		
	본예산 (A)	추경 (B)	정부안 (C)	확정 (D)	(D-A)	%	
합 계	453,682	452,087	467,698	469,672	15,990	3.5	
인건비	107,188	107,032	107,724	107,724	536	0.5	
기본경비	15,810	15,532	16,020	16,020	210	1.3	
주요사업비	329,739	328,578	340,910	342,884	13,145	4.0	
일반회계	- 일반	136,754	136,417	147,761	149,870	13,116	9.6
	- R&D	111,050	110,267	109,668	109,533	△1,517	△0.1
	- 정보화	75,094	75,053	76,196	76,196	1,102	1.5
	- ODA	6,841	6,841	7,285	7,285	444	6.5
혁신도시건설특별회계	945	945	3,044	3,044	2,099	222.1	

기상청의 예산구조는 8개 프로그램과 14개 단위사업, 그리고 60개 세부사업으로 구성되어 있다. 2023년 기준으로 기상행정지원의 예산이 전체 예산의 29.4%를 차지하며, 기상관측 부문의 예산이 두 번째로 많은 27.6%를 차지하고 있다. 2021년 대비 예산이 가장 많이 증가한 부문은 기상서비스 진흥(2023년 예산 316억 원)으로 이는 국가기후자료 관리 및 서비스체계 구축을 위한 정보화사업(123억 원)의 확대 때문이다<표 4>.

(단위: 백만 원)

<표 4> 기상청의 예산구조

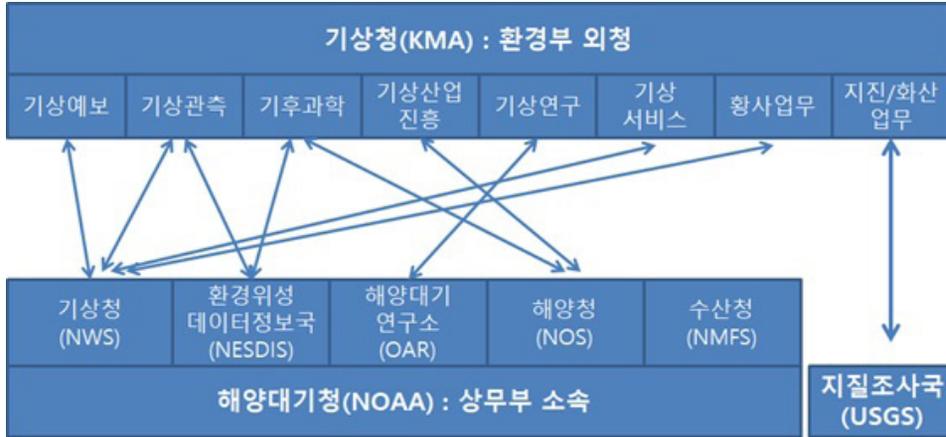
프로그램	2021년	2022년	2023년
기상예보	8,007	8,018	11,758
기상관측	115,364	122,655	129,640
기후변화과학	13,249	14,538	15,016
기상서비스 진흥	18,045	29,476	31,591
기상연구	68,568	70,623	66,133
책임행정기관 운영	56,774	62,080	66,343
국제협력교육홍보	10,257	10,469	11,055
기상행정지원	135,395	134,795	138,136
합계	425,659	452,654	469,672

### 3. 미국과 한국의 기상 관련 예산 비교

NOAA는 상무부 소속기관으로 기상정보의 생산 및 가공, 전파는 물론 상업적 활용을 중시하고 있어 환경부의 외청인 우리나라 기상청과는 역할과 마인드 측면에서 차이가 있다고 판단된다. 흔히 비교되는 NWS와 기상청의 역할과 업무를 구체적으로 살펴보면, NWS는 기상예보의 생산, 활용과 관련한 업무만을 담당하고 있는 반면, 기상청은 기상예보 생산, 기상관측, 기후변화과학, 기상서비스진흥, 기상연구 등으로 NWS보다 역할과 업무 범위가 훨씬 넓다. 현재 기상청이 수행하고 있는 역할과 업무를 NOAA 산하의 4개 기관인 NWS, NESDIS, OAR, NOS가 나누어 수행하고 있는 셈이다. 따라서 미국의 기상 관련 예산과 기상청의 예산을 정확히 비교하기 위해서는 NOAA 산하 4개 기관의 업무를 분석하고 기상청의 예산과 비교할 필요가 있다. 다만, 기상청이 맡고 있는 지진/화산 관련 업무는 NOAA가 아닌 USGS(US Geological Survey)에서 수행하고 있다<그림 4>.



[그림 4] 미 해양대기청과 우리나라 기상청의 기관별 업무관계



미국의 기상 관련 예산을 추산한 결과 NOAA에 소속된 4개 기관의 2023년 예산은 51억 달러(한화 6조 6,312억 원)에 달한다. 특히 연구개발을 담당하는 OAR의 2023년 예산은 2021년 대비 2.3배 증가했는데, 이는 기후변화와 관련된 연구가 크게 확대된 것에 기인한다. 기상청의 예산은 NOAA 기상 관련 예산의 2021년 9.3% 수준에서 2023년 7.1% 수준으로 더욱 낮아지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 기상청 예산은 기상관측 및 예보에 한정된 업무를 수행하고 있는 NWS의 예산과 비교하더라도 27.3% 수준에 불과한 실정이다(표 5).

(단위: 백만 달러, 백만 원)

기상청 예산의 규모와 투자방향의 적정성을 평가하고 예산 확대의 근거자료를 확보하기 위해 활동 기반 분석기법(Activity Based

<표 5> NOAA 산하 4개 기관과 기상청 예산 비교

기관	2021년	2022년	2023년
NWS	1,120.3	1,226.0	1,323.4
OAR	326.7	597.8	774.8
NESDIS	1,504.0	1,513.9	2,282.9
NOS	555.6	884.6	719.8
소계 (한화 환산)	3,506.6 (4,558,544)	4,222.3 (5,489,019)	5,100.9 (6,631,226)
기상청	425,659	452,654	469,672

Accounting System, ABAS)에 입각하여 기상청의 예산구조와 NOAA 산하 4개 기관의 예산 구조를 유사한 프로그램과 단위사업별로 맵핑하여 비교 분석하였다. 분석 결과 미국의 기상 관련 순수 예산은 48.6억 달러(한화 6조 3,158억 원)로 기상청 예산의 13.4배 규모로 산출되었다. NOAA 산하 4개 기관의 예산 중 기상관측 60.6%, 기상예보 14.3%, 기후변화과학 12.7%, 책임

운영기관 5.3% 기상서비스진흥 4.4% 순으로 높은 비중을 차지하고 있다. 반면, 기상청은 기상 행정지원 29.4%, 기상관측 27.6%, 기상연구 및 책임운영기관 14.1%, 기상서비스진흥 6.7%, 기후변화과학 3.2%, 기상예보 2.5%의 비중을 차지하고 있다. 활동 기반 분석기법을 통해 양국의 예산구조를 비교 분석한 결과 미국은 우리나라 기상청보다 기상예보(76.5배), 기후변화과학(53배), 기상관측(29.5배), 기상서비스진흥(8.8배), 기상연구(2.4배) 분야에 더 많은 예산을 배정하고 있음을 확인할 수 있다.

기상청 예산 규모의 적정성을 가늠하는 또 다른 방법으로 기상정보 사용자인 양국의 인구수를 고려하여 국민 1인당 기상정보 생산에 투입된 예산을 비교하였다. 계산 결과 2023년 우리나라는 국민 1인당 기상정보 제공을 위해 9,078원의 예산을 투입하는 반면, 미국의 1인당 예산은 19,029원으로 우리나라의 2.1배에 달하는 예산을 투입하는 것으로 파악되었다(표 6).

〈표 6〉 미국과 한국의 국민 1인당 기상 관련 예산 비교

구분	미국	한국	비교
기상 관련 예산 (백만 원)	6,315,806 (4,858백만 달러)	469,672	13.4배
인구수(천 명) (*21년 기준)	331,900	51,740	6.4배
국민 1인당 기상 관련 예산(원)	19,029	9,078	2.1배

하지만 우리나라 기상청 예산의 적정성을 보다 정확히 진단하기 위해서는 추가 작업이 필요하다. 우선, 우리나라 기상청이 수행하는 지진/화산 업무의 경우 미국은 USGS에서 전담하고 있어 NOAA 위주의 예산 분석에서 빠져 있는데, 엄밀하게는 기상 관련 예산에 포함하는 것이 타당하다. 또한 USGS의 예산에는 자연재해, 가뭄, 수자원 관측 등 기상 및 기후변화 관련 예산이 적지 않게 편성되어 있으므로 이들 예산도 포함될 필요가 있다. 둘째, 기상 관련 그리고 미국의 국가 R&D사업은 NSF(National Science Foundation)가 총괄하고 있어 기상 관련 R&D 예산을 모두 반영하려면 NSF 예산도 살펴봐야 한다. 셋째, 연방정부인 NOAA 차원의 예산 분석은 주 정부 차원의 기상 관련 예산을 포함하고 있지 않으므로 완벽하지 않다. 극한기상 현상이 국지적으로 빈번히 발생하고 있어 미국은 연방정부와 주정부 간의 협력사업이 증가하는 추세이고 주 정부 차원의 독자적인 기상 관련 예산도 적지 않으므로 주정부 단위의 기상 관련 예산까지 포함해야 진정한 예산 비교가 가능할 것이다.



### III. 정책적 시사점

기후변화로 인한 가뭄과 홍수 등 극한기상 현상의 증가, 이로 인한 인명 및 재산 피해 증가, 미국과 EU와 같은 기상선진국들의 기후경제시대에 대비한 기상 관련 투자 확대 등을 고려한다면 기후위기 감시·예측을 위한 총괄 지원기관으로서 기상청의 역할은 더욱 확대·강화될 필요가 있다. 그리고 이를 위해서는 기상청 예산의 지속적인 확대가 요구된다. 기상청은 예산 확대의 근거 자료로 NOAA의 2022-2026년 정책 방향을 참고해봄직하다.

NOAA의 첫 번째 정책 방향은 WRN의 실현이다. 미국은 국지적인 극한기상 관측 및 예보 강화, 기후변화 연구 및 대응 지원에 역점을 두고 있다. 갈수록 증가하는 국지적인 극한기상 현상에 대비하기 위해 미국은 연방정부와 주정부 간의 연계사업을 강화하고 있으며 주정부 차원의 기후변화위기 대응 예산도 증가하고 있다. 미국은 국지적인 기상현상을 실시간 관측하여 자연 재해를 최소화할 수 있도록 주/지역 차원의 지상관측 네트워크를 활용하고 강화하는 정책인 NMP(National Mesonet Program)를 통해 NWS의 제한적인 기상서비스를 보완하고 있다. 현재 38개주가 NMP를 채택하고 있으며, 2022년 7월 미 의회는 관련법인 「National Mesonet Authorization Act」 제정을 통해 지상관측 네트워크의 전국 확산을 지원하기 위한 법제도적 기반을 마련한 바 있다. 미 정부는 산·관·학이 연계한 지상관측 네트워크를 전국적으로 업그레이드하여 국지적인 극한기상 현상을 30분 미리 예보하도록 할 방침이다. 또한 미국은 기상예측모델에 사용되는 데이터의 95%를 인공위성을 통해 수집하고 있어 차세대 환경위성 개발은 물론 인공위성을 통해 수집되는 기상데이터를 기반으로 한 예측모델 강화를 위해 인공지능 및 머신러닝 등의 기술개발을 적극 지원하고 있다. NWS와 기타 정부기관 및 부서에서 수집한 기상 데이터 관리와 국가 환경위성 프로그램을 운영 및 관리하는 NESDIS의 역할이 갈수록 중시되고 있다. NESDIS는 차세대 위성 개발 및 시스템 구입을 위해 막대한 예산을 예비비 형태로 편성해 놓고 있다. 우리나라 기상청도 정지궤도 기상·우주기상 위성(천리안위성 5호) 개발 사업을 차질 없이 추진할 필요가 있다.

두 번째 정책 방향은 기후변화 대응에 있어 지역 형평성(equity)의 증시다. 넓은 국토와 많은 인구를 갖고 있는 미국은 극한기상(산불, 폭염, 가뭄, 홍수, 수온 및 해수면 상승, 허리케인, 토네이도 등) 및 기후변화에 노출되어 있으나 기상정보서비스를 충분히 제공받지 못하는 많은 취

약지역사회(underserved and vulnerable communities)가 존재하고 있다. 미국 정부는 이들 취약지역사회를 위해 관측 및 예보서비스를 강화하고 기후위기 대응체제 구축을 지원하고 있다. NOAA의 CAPs(Climate Adaptation Partnerships)는 물론 DOI(Department of the Interior)의 CASCs(Climate Adaptation Science), USDA(US Department of Agriculture)의 Climate Hubs 등이 연방정부 차원의 지역참여를 통한 대응체제라 할 수 있다. 특히 NOAA 기후프로그램사무국의 Climate-Smart Communities Initiative는 낙후지역의 기후변화 대응을 지원하기 위한 프로그램이다. 기상청도 국지적으로 증가하는 극한 기상현상을 집중 분석하고 지역 맞춤형 기상관측 및 예보서비스를 제공함으로써 지역별로 기상이변에 대응할 수 있는 지원체제를 강화할 필요가 있다.

세 번째 정책 방향은 블루이코노미의 성장 지원이다. 해양, 해안, 오대호는 지구의 대기와 밀접한 관계가 있으므로 해양-지구간 상호작용을 정확히 이해해야 극한기상 현상과 생태계 변화를 예측할 수 있다. 미국은 해양 및 연안, 오대호 기상관측 및 기후변화 영향 연구 강화, 해상풍력 등 재생에너지산업의 육성을 지원하기 위한 기상 및 기후변화 대응을 강화하고 있다. 기상청은 2050년 탄소중립사회 실현을 앞당기고 기후경제시대의 새로운 성장 동력 확보 차원에서 현재 국가적으로 추진 중인 스마트시티, 도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM), 태양광/풍력 등 신재생에너지 산업을 위한 다양한 기상데이터는 물론 관련 부문에 특화된 기상정보를 생산, 활용할 수 있도록 예산과 인력의 투자를 확대할 필요가 있다.

## 참고문헌

- 기상청, 2022: 2023년도 예산 사업설명자료(II-1).
- 기상청, 2022: 2023년도 세입세출예산 각목명세서.
- 기상청, 2022: 2023년도 기상청 소관 세입세출 예산 개요.
- 기상청, 2023: 주요 업무계획.
- 박혜숙, 이진화, 2022: 2021년 특이기상연구센터 대표성과 사례집, 국립기상과학원.
- Department of Commerce, 2022: 2022-2026 Learning Agenda.
- European Commission, 2019: Copernicus Programme. <https://www.copernicus.eu/en>
- European Commission, 2022: Copernicus Climate Change Service(C3S).
- Mahmood, R., Boyles, R., Brinson, K., Fiebrich, C., Foster, S., Hubbard, K., Robinson, D., Andresen, J. and Leathers, D., 2017: Mesonets: Mesoscale Weather and Climate Observations for the United States, American Meteorological Society, BAMS Volume 98: Issue 7, 1349-1361, DOI: <https://doi.org/10.1175/AMSG-10-01-17-0011>



org/10.1175/BAMS-D-15-00258.1.

McKinsey&Company, 2020: Becoming a Weather-Ready Nation.

National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023: Budget Estimates Fiscal Year 2023.

National Research Council, 2004: Where the Weather Meets the Road: A Research Agenda for Improving Road Weather Services. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10893>.

National Research Council, 2009: Observing Weather and Climate from the Ground Up: A Nationwide Network of Networks, Washington, DC: National Academies Press.

NOAA, 2011: National Weather Service Strategic Plan: Building a Weather-Ready Nation.

NOAA, 2016: National Environmental Satellite, Data, and Information Service Strategic Plan. NOAA, 2019: National Weather Service 2019-2022 Strategic Plan.

NOAA, 2020: Research and Development Vision Areas: 2020-2026.

NOAA, 2020: 2019-2022 NWS Strategic Plan Status Update.

NOAA, 2020: NOAA 2020 Budget Summary.

NOAA, 2021: 2021 NOAA Science Report.

NOAA, 2022: Building a Climate Ready Nation - NOAA FY22-26 Strategic Plan.

NOAA, 2023: Budget Summary FY2023.

Office of Management and Budget, 2023: Appendix Budget of the U.S. Government Fiscal Year 2023, The White House.

Pulwarty, R., Simpson, C. and Nierenberg, C.R., 2021: The Regional Integrated Sciences and Assessments(RISA) Program: crafting effective assessments for the long haul, 367-393.

The House of Representatives, 2022: National Mesonet Authorization Act, 117th Congress 2nd Session H. R. 8397.

U.S. Global Change Research Program, 2018: Fourth National Climate Assessment, <https://nca2018.globalchange.go>.

Weather Program Office, 2022: FY 2021 Annual Accomplishments, NOAA Research.

Wilson, E., 2022: National Mesonet.

The Department of Commerce, 2023: Budget in Brief Fiscal Year 2023.

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

항공기 관측과 활용, 제1권 제3호(통권 제3호), 2008년 9월

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

## 기상기술정책지 발간 목록

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

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

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

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

### 기후변화와 수문기상, 제2권 제2호(통권 제6호), 2009년 6월

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

## 기상기술정책지 발간 목록

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

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

### 날씨·기후 공감, 제2권 제4호(통권 제8호), 2009년 12월

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

### 기후변화와 산업, 제3권 제1호(통권 제9호), 2010년 3월

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

## 기상기술정책지 발간 목록

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

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

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

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

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

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

## 기상기술정책지 발간 목록

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

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

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

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

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

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

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

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

## 기상기술정책지 발간 목록

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

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

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

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

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

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

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

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

## 기상기술정책지 발간 목록

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

칼 럼	• 장마와 날씨경영	고윤화	3-5
정책초점	• 수자원 확보에 있어서 장마의 역할	박정수	8-16
	• 장마가 농업생산에 미치는 영향	최지현	17-24
	• 장마의 변동성과 예측성 향상	서경환	25-30
	• 장마기간 유통산업 영향 및 전략	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	예상욱	6-17
	• 교통안전관리를 위한 도로기상정보 활용	손영태	18-30
	• 태풍 재해 리스크 관리를 위한 영향예보	이은주	31-40
	• 기상, 기후 그리고 숲과 사람	박주원	41-55
	• KISTI 재난대응 의사결정지원시스템(K-DMSS) 소개	조민수	56-70
논 단	• 기상예측정보를 활용한 농경지 물사용 영향예보	최진용, 홍민기, 이성학, 이승재	71-81
	• 화재 기상예보 서비스	류정우, 권성필	82-92
포 커 스	• 오픈데이터와 일본기상비즈니스 컨소시엄	정효정	93-107

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

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

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

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

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

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

## 기상기술정책지 발간 목록

### 겨울철 위험기상의 사회경제적 영향, 제12권 제2호(통권 제29호), 2019년 12월

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

### 중규모 대류계 기상현상의 이해와 대응, 제13권 제1호(통권 제30호), 2020년 6월

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

### 유관 부처 기상정보 관측·예측기술 현황, 제13권 제2호(통권 제31호), 2020년 12월

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

### 미래 도심항공교통(UAM) 준비를 위한 지식·기술 그리고 정책, 제14권 제1호(통권 제32호), 2021년 6월

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

## 기상기술정책지 발간 목록

### 2050 탄소중립 대응 전략, 제14권 제2호(통권 제33호), 2021년 12월

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

### 기상특보의 사회경제적 효과, 제15권 제1호(통권 제34호), 2022년 6월

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

### 지진·화산·지진해일 기술동향 및 추진방향, 제15권 제2호(통권 제35호), 2022년 12월

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

### 선진 기술동향 및 미국 기상예산 분석, 제16권 제1호(통권 제36호), 2023년 6월

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

# 『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



