

# APEC기후센터 2021년 제2차 기후예측워크숍

기후예측 기술개발 현황 및 향후 발전 방향



- 일시 : 2021. 5. 10(월) - 11(화)
- 장소 : 부산 벡스코 컨벤션홀 1층 회의실
- 주관 : APEC기후센터

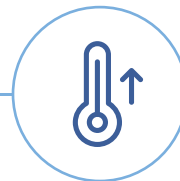






# APEC기후센터 2021년 제2차 기후예측워크숍

기후예측 기술개발 현황 및 향후 발전 방향



- 일시 : 2021. 5. 10(월) - 11(화)
- 장소 : 부산 벡스코 컨벤션홀 1층 회의실
- 주관 : APEC기후센터



# 워크숍 프로그램

세션	발표 주제	발표자	소속
<b>5.10.(월)</b>			
13:00-14:00	<b>등록</b>		
14:00-14:10	<b>개회 (사회 : APCC 대외협력과 문상원 과장)</b>		
14:00-14:10	개회사	권원태	APCC
14:10-14:50	<b>기조연설</b>		
14:10-14:50	계절 내 극한기후 발생 전망과 이를 지배하는 주요인자들	하경자	부산대
14:50-17:10	<b>세션 1. 최근 국내외 기후감시 및 분석 (좌장 : APCC 기후분석과 이우섭 과장)</b>		
14:50-15:10	2020년 우리나라 주요 기후특성	임교순	기상청
15:10-15:30	2020년 세계 이상 기후	김선태	APCC
15:30-15:50	<b>휴식</b>		
15:50-16:10	동아시아 여름철 기온에 대한 인도양의 영향	국종성	포항공과대학교
16:10-16:30	2019년 9월 기록적인 태풍 영향의 원인규명 연구	성민규	포항공과대학교
16:30-16:50	한반도 식생형태별 농림기후 변동성 및 모니터링	이서연	국가농림기상센터
16:50-17:10	한반도 주변 해양기후변화 통합관측 전망	남성현	서울대학교
17:10-17:30	기록적인 2020년 여름 집중호우의 종관적 특성과 대규모 대기 순환의 역할	손석우	서울대학교
17:30-18:00	<b>포스터 세션</b>		
<b>5.11.(화)</b>			
09:00-10:30	<b>세션 2. 기후예측모델 개발 동향 (좌장 : APCC 예측기술과 김형진 과장)</b>		
09:00-09:30	위성 기반 토양수분 자료동화 및 대기-해양 결합 자료동화 기법의 개발과 활용	이명인	울산과학기술원
09:30-09:50	기상청 기후예측시스템 운영현황과 계획	부경은	국립기상과학원
09:50-10:10	기상청 기후예측모델 개선을 위한 계절내 예측 오차 특성 분석	함수련	APCC
10:10-10:30	GRIMs 모형의 기후 특성	송강현	연세대학교
10:30-10:50	<b>휴식</b>		

세션	발표 주제	발표자	소속
10:50-12:20	<b>세션 3. 기후예측신기술 (좌장: 이화여대 유창현 교수)</b>		
10:50-11:20	기계학습 기반 특이 기상 예측	임정호	울산과학기술원
11:20-11:40	현업 계절 예측 성능과 활용성 제고를 위해 실험중인 새로운 방법들	김원무	APCC
11:40-12:00	근지표면 온도 예측성이 가뭄 계절적 예보에 미치는 영향: 미국의 사례연구	감중훈	포항공과대학교
12:00-12:20	역학-통계모형 결합을 통한 3-6주 기온 확률예측 성능 개선	김민주	이화여자대학교
12:20-13:30	<b>점심</b>		
13:30-15:00	<b>세션 4. 기후예측 정보 전달 현재와 미래 (좌장: APCC 기후분석과 김선태 선임연구원, 이현주 연구원)</b>		
13:30-14:00	기후 정보 전달 방향에 대한 논의	김세현	JTBC
14:00-14:20	탄소중립과 철강 산업의 대응	김정인	중앙대학교
14:20-14:40	클라우드 플랫폼 기술을 이용한 APCC 기후서비스 개발	이현록	APCC
14:40-15:00	메타데이터와 데이터 간 상호 연계성에 기반한, 통합형 기후예측 정보 모델 구축/활용 방안 및 포스트 코로나 아태지역 경제협력에 대한 시사점	박지은	Terra.do
15:00-15:20	<b>휴식</b>		
15:20-16:20	<b>종합 토론. 기후정보의 사회적 활용 (좌장: 울산과학기술원 이명인 교수)</b> 패널: 울산과학기술원 임정호 교수, 서울대 손석우 교수, 한겨레 신문 이근영 선임기자, 기상청 이현수 과장, APCC 유진호 본부장		

# INDEX

---

- 01**    **기조연설**  
1p
- 02**    **세션 1. 최근 국내외 기후감시 및 분석**  
5p
- 03**    **세션 2. 기후예측모델 개발 동향**  
15p
- 04**    **세션 3. 기후예측신기술**  
21p
- 05**    **세션 4. 기후예측 정보 전달 현재와 미래**  
29p
- 06**    **포스터**  
37p





---

# 기조연설



# 계절 내 극한기후 발생 전망과 이를 지배하는 주요인자들

하경자

IBS기후물리연구단, 부산대 대기환경과학과

우리나라를 비롯한 동아시아의 많은 지역에서 여름철 폭염이 더 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 기후 변화는 인간 활동으로 인한 다량의 화석연료 사용이 주요 원인으로 꼽힌다. 그런데 지구가 평균적으로 온난화된다고 하더라도, 모든 지역의 극한 강수 현상이 지구온난화 때문에 발생하는 것은 아니다. 인위적인 영향으로서 온실기체와 에어로졸의 영향, 그리고 자연적 변동성들이 한반도 강수량의 장기 변화에 영향을 미칠 수 있는 주요 원인을 살펴보았다. 또한 계절 내 극한기후 현상들을 폭우 및 폭염으로 나누어 각 극한 현상 발생의 매커니즘과 그 과정을 이해하고 각각의 극한 현상을 지배하는 주요인자들을 찾아 예측성을 향상시키고자 한다. IBS기후물리연구단이 제공하는 고분해능 미래예측 자료를 통하여 온실기체에 의한 온난화 기후에서 이들의 지역별 전망도 하고자 한다.

이 발표에서 다음의 세 가지 결과를 강조하려고 한다. 첫째, 인위적 및 자연적인 강수 변동성을 비교하였다. 그 결과 지구 평균 기온이 1°C 상승할 때 마다 장마 강수량은 약 2~4% 정도 증가할 수 있으며, 에어로졸 배출의 증가는 장마 강수량을 감소시키는 경향이 있다. 그러나 P20으로 본 극한강수 발생은 21세기 말에 동아시아가 69%로 가장 강하게 증가하며 이어 인도 몬순이 57% 증가를 보인다. 동아시아 지역의 RX1day와 R95p는 각각 68%와 42% 증가한다. 둘째, 고분해능 기후 모델 실험에 따르면 우리나라 폭염 강도, 폭염지속기간, 열스트레스 지수는 이산화탄소 농도 증가에 따라 전반적으로 증가하는 모습을 보였다. 특히 4배 CO<sub>2</sub>조건 하에서 현재 기후 대비 우리나라 동쪽은 다른 지역에 비해 폭염 기간의 증가는 적은 반면, 폭염 강도는 더 강하게 나타났다. 셋째는 동아시아 건조 열파와 관련한 지표 온도 아노말리에 기여한 피드백 속성을 정량적으로 얻은 결과로서 총 에너지 균형을 기반으로 한 Coupled atmosphere-surface climate Feedback-Response Analysis Method 방법을 사용하였다. 토양 수분 부족이 잠열속과 지표 역학 과정에 의해 표면에서 대기로의 열 방출을 줄임으로써 지표 온난화에 기여하는 점과 구름 피드백 경우 고기압활동과 함께 논의된다.





세션  
01

# 최근 국내외 기후감시 및 분석



## 2020년 우리나라 주요 기후특성

최정희, 임교순, 김미주, 박미나, 김정식  
기상청 기후변화감시과

2020년은 전국 연평균기온(13.2°C)이 1973년 이래(이하 역대) 다섯 번째로 높았으며, 최근 6년(9위 2017년, 12위 2018년 제외)이 상위 5위 안에 기록되는 온난화 경향을 이어갔다.

시기별 주요 기후특성을 보면, 1월(2.8°C)과 겨울철(2019년 12월~2020년 2월, 3.1°C) 기온이 역대 1위를 기록하면서 기후변화 속에서 이례적으로 따뜻했고 한파일수 또한 가장 적은 특징을 보였다. 봄철인 3월 기온도 상위 2위를 기록할 만큼 높았으나, 4월은 쌀쌀했던 날이 많아 44위(하위 5위)까지 떨어졌고, 5월은 다시 소폭 상승(14위)해 월별 널뛰기 기온변동을 보였다. 여름철은 6월 시작부터 이른 폭염이 한 달간 지속되면서 전국 평균기온과 폭염일수가 역대 1위를 기록했던 반면에, 7월은 선선했던 날이 많아 6월(22.8°C) 평균기온이 7월(22.7°C)보다 높은 이상 현상이 관측 이래 처음으로 나타났다. 이와 관련하여, 장마철은 중부와 제주에서 각 54일, 49일로 역대 가장 길었고, 잦은 집중호우로 인해 장마철 전국 강수량(693.4mm)은 역대 2위를 기록하였다. 이러한 원인은 대기 정체(블로킹)로 편서풍이 약해지고 우리나라 주변으로 북쪽 찬 공기의 유입이 잦았던 가운데, 서인도양에는 해수면 온도가 높고 대류가 매우 활발하여 동인도양~필리핀해 부근에서 대기보상 하강 운동으로 대류 억제가 강화됨에 따라, 북태평양고기압이 남~서쪽으로 크게 확장하면서 북쪽으로는 확장이 지연되었기 때문으로 분석되었다. 한편, 2020년 태풍은 총 23개가 발생하여 이 중 4개(제5호 장미, 제8호 바비, 제9호 마이삭, 제10호 하이선)가 8~9월 초까지 우리나라에 영향을 주었다. 특히, 고수온역(29°C 이상)을 통과하면서 강도를 유지한 채 8~10호 태풍이 연이어 영향을 주면서 우리나라에 피해가 컸다.

이처럼 2020년은 긴 장마철과 집중호우, 많은 태풍 영향 등 기후변화가 이상기상으로 빈번히 나타나는 것을 알려준 해로 분석되었다. 이에 기상청은 국민 안전 보장과 생활 편익을 위해, 기후위기 시대에 발맞춰 날씨예측 및 기후서비스 기술개발과 사전정보 제공에 최선을 다할 것이다.

# 2020년 세계 이상 기후

김선태

APEC기후센터

발표에서는 2020년 전반적인 전지구 기후 특성 및 이상기후 발생 현황, 아울러 관련된 원인들을 살펴보고자 한다. 전 지구 평균 기온이 지속적으로 증가하고 있는 가운데 2020년은 냉각 효과를 갖는 라니냐가 발달했음에도 불구하고 두 번째로 가장 더운 해로 기록되었다. 이러한 지구온난화가 증가하고 있는 가운데 북극 해빙 면적도 감소하고 있는데, 2020년 7월과 10월은 역대 두 번째로 가장 적은 면적을 기록하였다. 특히 2020년에는 북극 대부분 지역의 기온이 이례적으로 높았고, 특히 6월은 1881년 이후 북극 최고 기온을 갱신 하였다. 아울러 북반구 눈덮임 면적은 1967년 이후 4번째로 가장 적었다. 해양 생태계에 영향을 미치는 전 지구 평균 해양 열용량은 가장 많았던 2019년 기록을 유지하였다. 이렇게 온난화가 진행하는 동안 2020년 세계 곳곳에는 이상 기후가 발생하였다. 예를 들면 6-8월 중국, 일본등 동아시아에서는 기록적인 긴 장마 기간과 집중호우, 최다 강수량을 기록하였으며, 미국 캘리포니아 포함 서부지역에서는 여름철 기록적인 폭염과 함께 산불이 지속되었다. 또한 2020년은 역대 가장 활발한 허리케인 시즌을 보냈는데, 31개의 열대성 저기압이 발생하여 2005년의 기록을 갱신하였다. 이들 이상 기후들은 많은 인명과 재산피해를 유발하였다. 본 발표에서는 위와 같은 2020년 이상 기후 사례들 뿐만 아니라 발생과 관련된 가능한 원인들에 관하여 간략하게 토론이 될 것이다.

## 동아시아 여름철 기온에 대한 인도양의 영향

국종성, 김선용

포항공과대학교 환경공학부

여름철 북인도양의 해수면 온도와 동아시아 기온은 유의한 음의 상관관계가 나타난다. 그러나 이 관계는 각 월마다 매우 다르게 나타나며, 동시상관 관계보다는 1개월 지연관계에서 높은 상관관계가 나타났다. 특히, 6월 북인도양의 해수면 온도 상승이 7월 한반도 기온과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 6월의 해수면 온도는 직접적으로 대류활동 상승으로 연결되었지만, 그 이후 달에는 이러한 관계가 약해진다. 해수면 온도에 대한 대류활동 민감도는 여름철 내의 해수면 온도 평균 온도와 관련이 있는 것으로 분석되었다. 북인도양의 해수면 온도는 6월에 높지만, 여름 몬순이 강화되면서 평균 해수면 온도가 낮아지면서 해수면 온도 아노말리에 대한 대류활동 민감도도 감소하는 것으로 분석되었다. 6월의 해수면 온도 상승에 의한 대류활동 증가는 대기의 켈빈파를 유도하여 서태평양까지 전파되며, 이는 북서태평양의 대류활동 감소를 유도한다. 대류활동 감소는 북서태평양에 고기압성 흐름을 유도하고, 천천히 북진하는 패턴을 보인다. 북진한 북태평양의 대류활동 감소는 PJ 원격상관 패턴을 유도하여, 이로 인한 한반도 지역에 저기압성 흐름을 유도하게 된다. 저기압성 흐름은 동아시아 지역에 북풍 바람을 유도하므로 기온을 낮추는 역할을 하게 된다. 이러한 인도양으로부터 동아시아 지역까지 영향에 대한 역학과정은 1달 정도 지연효과가 있으므로, 강한 지연 상관관계가 나타나는 것으로 분석되었다.

## 2019년 9월 기록적인 태풍 영향의 원인규명 연구

성민규<sup>1)</sup>, 민승기<sup>1)</sup>, 차동현<sup>2)</sup>, 이민규<sup>2)</sup>, Fraser C. Lott<sup>3)</sup>, Andrew Ciavarella<sup>3)</sup>, Peter A. Stott<sup>3)</sup>, 김맹기<sup>4)</sup>, 부경은<sup>5)</sup>, 변영화<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>포항공과대학교, <sup>2)</sup>울산과학기술원, <sup>3)</sup>영국기상청,

<sup>4)</sup>공주대학교, <sup>5)</sup>국립기상과학원

2019년 9월 관측 이래 처음으로 3개의 태풍이 연달아 한반도에 영향을 미쳐 큰 피해를 주었다. 본 연구에서는 이러한 기록적인 태풍 영향에 미치는 인위적, 자연적 요인의 기여를 각각 인위적 온난화와 인도 북서지역의 강한 대류활동을 중심으로 평가하였다. 관측 종관패턴에서 나타난 특징을 바탕으로 동중국해 지역의 남동풍 지향류 편차가 태풍이 한반도로 유입되는 호조건임을 파악하고, 중국 남동 내륙지역과 동해 두 지역 간의 200 hPa 지위고도 차를 이용하여 정의한 대기순환 지수(G200)를 활용하여 분석하였다. 먼저 인위적 온난화의 영향을 파악하기 위해 CMIP6 및 영국기상청의 HadGEM3-A 대규모 앙상블 모의자료를 이용하여 인위적+자연적 강제력(ALL)이 주어졌을 때와 자연강제력(NAT)만 주어졌을 때 관측된 G200이 나타날 확률을 구하여 비교하였다. 두 모델 모두 인간 활동이 있을 때와 없을 때 관측 G200이 나타날 확률은 약 2~3% 범위에서 유사하게 나타났으며 이는 2019년 9월 태풍을 한반도로 향하게 만든 지향류 패턴에 인위적 강제력 영향이 크게 작용하지 않았음을 의미한다. 유사한 방법으로 인도 북서지역의 강한 대류활동의 영향을 파악하기 위해 같은 모델 자료를 이용하여 대류가 강한 경우(SC)와 약한 경우(WC) 관측 G200이 나타날 확률을 구하여 비교하였다. 그 결과 북서 인도 대류가 강할 때 그 확률이 CMIP6에서는 최소 3배 이상, HadGEM3-A에서는 최소 1.5배 이상 높아지는 것으로 나타났다. 결과적으로, 2019년 9월 기록적인 태풍의 한반도 영향은 인위적인 온난화의 영향 보다는 인도 몬순의 늦은 종료와 연관된 대기 원격상관 패턴이 중요하게 기여한 것으로 판단된다. 또한 이 결과는 가을철 태풍의 한반도 영향의 예측성을 높이는데 인도몬순 변동성이 중요한 인자로 활용될 수 있음을 시사한다.

## 한반도 식생형태별 농림가뭄 변동성 및 모니터링

이서연, 이승재  
(재)국가농림기상센터

지표면 식생은 그 마다의 생태계 기능 역할을 하고 있으며 그 역할에 대한 정보를 관측 및 모델링을 통해서 수집하여야 물의 순환을 올바르게 이해하고 예측할 수 있다 (Lee et al., 2013). 이 연구에서는 지난 42년 (1979년~2020년) 동안 한반도 내 식생형태별 가뭄 발생 양상에 관한 연구를 진행하였다. 가뭄은 산업, 경제, 환경, 인간의 삶 등 사회 전반에 많은 영향을 미치는 현상으로서, 특히 한반도의 약 70% (남한 국토의 약 63%)가 산림지역을 이루고 있기에 식생형태별 가뭄 정도를 파악하고, 가뭄에 대비하는 것은 매우 중요한 문제라 할 수 있다. Lee et al. (2021)은 한반도 내에서  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  고해상도 ERA5 재분석 자료를 이용한 식생별 가뭄 진단과 모니터링의 적정성 및 타당성을 보였다. 이에 따라 지난 42년간의 한반도 내의 가뭄의 원인과 강도를 ERA5 재분석 자료를 기반으로 한반도 내에서 비교적 정확하게 가뭄을 산정하는 RAI와 함께 강수, 기온, 일사, 토양수분함량 등 다양한 기후 인자들을 고려하여 살펴보았다. 일반적으로 가뭄은 높은 기온, 많은 일사량, 낮은 풍속에 수반하여 나타나는 경향성이 있다. 키 낮은 식생이 주로 분포하는 지역에서는 첫 번째와 두 번째 토양층 (-28 ~ 0cm)의 토양수분함량이 가뭄과 밀접하고 민감하게 반응하고 있었다. 따라서 키 낮은 식생이 분포하는 지역(농업지역)에서는 표층 근처의 강수량 및 증발산량의 모니터링 빈도를 높여야 한다. 한편, 키 큰 식생이 많이 분포하는 지역(산림지역)의 경우에는 가뭄이 발생하고 한 달 후에 세 번째 토양층 (-100 ~ -28cm)에서 큰 영향을 받는 것을 확인하였다. 이를 통하여 산림지역의 강수량과 증발산량의 변화 추이를 모니터링 하면 한 달 후 발생할 산림 가뭄에 미리 대비할 수 있다는 결론을 얻었다. 더 나아가 지난 40여 년간 한반도에서의 식생형태별 가뭄이 변동성을 살펴보기 위하여 십 년 주기의 가뭄빈도 및 강도를 살펴본 결과 특별한 경향성은 보이지 않았지만 2000년대 이후 강도 높은 가뭄의 빈도수가 증가하였다. 이러한 정보를 바탕으로 가뭄에 대비한 정확한 가뭄 예·경보 시스템의 도입과 가뭄 해갈을 위한 적정 용수의 확보와 관리가 농림기상 분야에서 계속해서 고도화되어야 할 것이다.

※ 사사: 이 연구는 농업식품기술기획평가원의 농촌 현안 해결 리빙랩 프로젝트사업 (120099-03) 의 지원으로 수행되었습니다.

## 한반도 주변 해양기후변화 통합관측 전망

남성현<sup>1)</sup> 및 국내외 다수의 관측해양학자

<sup>1)</sup>서울대학교 지구환경과학부

심각한 전 지구적 기후위기와 각종 기후재해/재난을 경험하고 있는 오늘날 지구온난화로 증가된 열 에너지의 대부분(90% 이상, 1970년부터 2010년까지 250 ZJ)이 흡수된 해양환경의 기후적 요소 변화(해양 기후변화)를 관측/감시하는 것은 중요하고 시급한 과제가 되었다. 기상청에서는 기후정보포털을 통해 자체 관측 정보 외에도 국립수산과학원, 국립해양조사원, 해양환경공단 등 유관기관의 한반도 주변 해역의 해양 기후변화 통합관측 정보(해수면, 수온, 염분, 열용량, 산성화, 해양기상 등)를 제공 중이다. 그러나 한반도 주변 해양기후변화를 종합적으로 판단할 수 있는 현황 정보를 제공하기 위해서는 여전히 많은 노력이 요구 되는데, 여기서는 현재 운용 중이나 해양기후변화 통합정보 구축에 아직까지 활용이 미흡한 한반도 주변 해역의 관측을 소개하고, 동해 심층해수의 생성과 자오면 순환(meridional overturning circulation) 변동에 대한 최근 연구와 함께 한반도 주변 해양기후변화 통합관측을 전망하고자 한다. 특히, 유네스코 정부간해양 학위원회의 주요 해양관측 네트워크(ARGO, OceanSITES, GO-SHIP) 현황과 전망을 소개하고, 유엔 해양과학 십년(UN Decade of Ocean Science, 2021-2030) 기간에 한반도 주변 해양기후변화 통합관측 역량을 제고하기 위한 다각도의 방안을 토의한다.

## 기록적인 2020년 여름 집중호우의 종관적 특성과 대규모 대기 순환의 역할

박찬일<sup>1)</sup>, 손석우<sup>1)</sup>, 김혜라<sup>1)</sup>, 함유근<sup>2)</sup>, 김주원<sup>3)</sup>, 차동현<sup>4)</sup>, 장은철<sup>3)</sup>, 이규원<sup>5)</sup>,  
국종성<sup>6)</sup>, 이우섭<sup>7)</sup>, 이윤영<sup>7)</sup>, 이희춘<sup>8)</sup>, 임병환<sup>8)</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교, <sup>2)</sup>전남대학교, <sup>3)</sup>공주대학교, <sup>4)</sup>울산과학기술원

<sup>5)</sup>경북대학교, <sup>6)</sup>포항공과대학교, <sup>7)</sup>APEC 기후센터, <sup>8)</sup>국립기상과학원

지난 50년간 최고치의 강수량이 2020년 여름 기록되었다. 6월 중순~9월초에 발생한 총 15 건의 집중호우 중 11건이 6월 말~8월 중순에 발생했는데, 시기에 따라 종관적 특성에서 뚜렷한 차이를 보였다. 6월 29일~7월 27일(P1)에 발생한 집중호우는 온대저기압이 한반도를 통과하며 발생하였고, 7월 28일~8월 15일(P2)에 발생한 집중호우는 주로 몬순 강우대가 한반도 위에 형성되어 발생하였다. 본 연구에서는 이러한 급격한 집중호우 종관 특성 변화의 원인으로 대기 원격상관을 제시하였다. P1 기간에는 북태평양 고기압이 서쪽으로 길게 확장 하였으나, 북쪽으로는 확장은 남중국해의 대류활동이 평년보다 약화함에 따라 발생한 남북방향 파동 전파에 의해 억제되었다. 이러한 조건에서 몬순 강우대는 한반도의 남쪽에 치우쳐 있었으나, 온대저기압의 빈번한 통과를 야기하여 총 4건의 집중호우를 일으켰다. P2 기간에는 남중국해의 대류활동이 평년보다 강해지며 P1 기간과 반대 위상의 파동을 형성하였고, 이는 북태평양 고기압의 급격한 북상을 야기하였다. 북태평양 고기압 가장자리의 강한 기압경도를 따라 다량의 수증기를 포함한 몬순 남서류가 유입되었고, 한반도 위에 몬순 강우대가 형성되어 결과적으로 6건의 집중호우가 발생하였다. P1과 P2 시기에 각각 음과 양의 북대서양 진동(summer North Atlantic Oscillation; SNAO) 또한 서로 반대 위상을 갖는 동서 방향 파동 전파를 일으켰는데, 장기간의 재분석 자료 분석을 수행한 결과 SNAO는 남중국해 대류활동에 의한 파동 패턴에 영향을 줌으로써 두 기간의 동아시아 대기 순환의 급격한 변화에 간접적으로 기여했음을 확인하였다. 본 연구는 동아시아 여름철 집중호우의 수일 규모-계절 규모에서의 예측을 위해서는 종관규모 특성뿐만 아니라 대규모 원격상관까지 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

※ 사사: 이 연구는 국립기상과학원의 지원으로 수행되었습니다(KMA2018-00121).





세션  
02

기후예측모델  
개발 동향



# 위성 기반 토양수분 자료동화 및 대기-해양 결합 자료동화 기법의 개발과 활용

이명인

울산과학기술원

기후모델을 활용한 계절예측의 성능 향상을 위해서는 모델의 최적화된 초기상태를 제공하는 자료동화 기술의 개발이 중요하다. 특히 최근 증가하는 가뭄, 폭염 등의 극한기상의 예측성능은 중위도 봄철 토양 수분 초기화의 영향을 크게 받고 있으며, 대기-해양 초기장 간의 불균형은 예측 초기에 예측 오차를 증가시키는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 기상청 현업 계절예측시스템을 기반으로 위성 자료 기반의 토양 수분 자료동화 기법 및 대기-해양 결합 자료동화 기법을 개발하고 활용 가능성을 평가하였다.

지면 자료동화 기법은 앙상블 칼만 필터를 사용하여 마이크로파 센서 기반의 다중 위성 자료를 혼합하여 지상 관측의 공간적 한계를 극복하고, 전 지구 토양 수분 분석자료를 생산하였다. 인공위성 기반의 토양수분 자료를 이용하여 지면모델을 초기화 하는 경우 2016년 동아시아 폭염 현상이 보다 현실적으로 모의되는 결과를 얻었다.

대기-해양 결합 자료동화는 기상청에서 독립적으로 생산하고 있는 전지구 대기분석장과 해양분석장 자료를 결합 모델을 이용하여 IAU 기법 (Incremental Analysis Update)을 통해 균형을 맞추는 약한 결합자료동화 기법을 개발하였다. 이를 통해 대기 모델과 해양 모델의 해수면 온도에서 나타나는 불일치를 완화하여 예측 초기에 나타나는 초기화 충격을 효과적으로 줄여 주는 것을 확인하였으며, 이와 같은 초기화 충격이 대류과정에서도 나타남을 확인하였다. 특히, 대류과정에서의 초기화 충격은 해수면 온도에서 나타나는 초기화 충격보다 더 오래 지속되며 예측성능을 저하하는 것으로 보인다. 본 연구에서는 결합 자료동화 기법을 통해 기존 현업 계절예측시스템 대비 열대 지역에서의 예측성능을 개선하였으며, 특히 중위도 지역까지 영향을 주는 열대 계절 내 변동인 MJO (Madden-Julian Oscillation)에 대한 예측성능이 유의하게 개선되는 것을 확인하였다.

현업운영을 목표로 현재 개발 중인 지면 및 대기-지면-해양-해빙 결합 자료동화 기술은 지구시스템을 구성하는 다양한 성분모델들에 최적화된 초기 조건을 제공함으로써 계절예측 성능을 개선하는 기대효과를 가지고 있다.

## 기상청 기후예측시스템 운영현황과 계획

부경은, 현유경, 이조한, 황승언

국립기상과학원

국립기상과학원에서는 장기예보지원을 위해 대기·지면·해양해빙이 결합된 기후모델기반의 앙상블예측시스템을 현업 운영하고 있다. 이는 기상청과 영국기상청간 기후예측시스템의 공동운영에 관한 협약 일환으로 도입 운영되고 있다. 현재 현업 기후예측시스템(GloSea5; MacLachlan et al. 2015)은 대기모델은 Met Office Unified Model 8.6 (Brown et al., 2012, Walters et al 2011)을 사용하고 지면모델은 Joint UK Land Environment Simulator 4.7; Best et al., 2011), 해양해빙모델은 Nucleus for European Modelling of the Ocean 3.4 (Madec, 2008), Los Alamos sea ice model 4.1 (Hunke and Lipscomb, 2010)으로 각 모델간의 대기해양 플럭스 교환을 위해 Ocean Atmosphere Sea Ice Soil3 (valcke, 2013) 커플러에 의해 하나의 시스템으로 결합되어 있다. 대기모델의 수평해상도는  $0.83^{\circ} \times 0.56^{\circ}$  (약 60km), 연직으로 는 85개 층(최상층 약 85km)이며, 해양모델은 수평 약  $0.25^{\circ}$ 으로, 연직 75개층으로 구성되어 있다. GloSea5은 과거 기후모의를 통해 얻어진 기후장과 예측장을 생산하며 기후장은 1991년부터 2016년에 대해 매달 특정일에 초기화되어 7개월 동안 적분 수행되며, 모델의 불확실성을 고려한 앙상블 멤버산출을 위해 확률적 운동에너지 후방산란 기법을 사용하여 각 초기시간에 대해 3개의 앙상블 멤버를 생산한다. 예측장은 1개월 전망을 위한 75일 예측과 3개월 전망을 위한 240일 예측이 매일 수행되며 각각 2개씩 총 4개의 앙상블 멤버로 수행된다. 생산된 예측자료는 1·3개월 전망에 사용되며 국제적으로는 WMO S2S 프로젝트 데이터베이스에 제공되어 활용되고 있다. 기후전망 수요가 증대하는 가운데 자료의 정확도를 높이는 일은 매우 중요하다. 이에 예측오차를 줄이고 성능을 높이고자 한영협력 및 학계와의 협력을 통해 시스템 개선을 위한 노력 역시 병행하고 있다.

※ 사사: 이 연구는 국립기상과학원 기상업무지원기술개발연구로 수행되었습니다.

# 기상청 기후예측모델 개선을 위한 계절내 예측 오차 특성 분석

함수련<sup>1)</sup>, 정여민<sup>1)</sup>, 임소민<sup>2)</sup>, 지희숙<sup>2)</sup>, 현유경<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>APEC기후센터, <sup>2)</sup>국립기상과학원

계절 (seasonal) 예측의 경우 대기 초기장의 영향을 크게 받는 기상 모델과는 달리 해양 강제력 등의 천천히 움직이는 기후 조건들의 영향만 중요하게 여겨져왔다. 계절내(subseasonal) 규모는 대부분 초기조건에 의존하는 기상(weather)과 해양 및 지면 등 경계조건에 의존하는 기후(climate) 예측의 중간 단계에 해당하는 3-4주에 해당하며, 그 예측 성능은 현저히 낮다고 알려져 있다. 선행시간 3-4주에 해당하는 계절내 예측 구간은 대기의 초기장의 효과가 거의 사라지는 것으로 알려져 있기 때문에 기후예측모델에서의 초기장의 효과는 많이 조사되지 않았다. 실시간 예측 모델에서는 초기장의 부재로 인해 재분석 자료가 아닌 기상모델에 의해 생산된 예측장을 초기장으로 사용하는 경우가 대부분이다. 실제로, 기상청 현업 기후 예측 모델(GloSea5)의 경우에도 과거 재현 기후와 실시간 예측에 사용되는 초기장이 다르게 처방되고 있다. 이 연구에서는 현재 기상청 현업 기후예측모델인 GloSea5를 사용하여 재분석 자료 및 기상 예측 자료를 초기장으로 처방한 계절내 예측장을 생산하고, 두 초기장 차이가 주는 계절내 예측 성능에 대한 비교를 통해 초기 오차가 계절내 예측 규모에서 가지는 영향에 대해 조사해 보고자 한다. 이 연구를 통해 현재 현업 시스템이 가지고 있는 초기 오차의 특성에 대해 파악하고, 나아가 현업 시스템의 계절내 예측 결과의 해석 및 개선점에 대해 생각해 볼 수 있을 것으로 기대한다.

※ 사사: 이 연구는 APCC 지원을 통해 수행되었습니다. 이 연구의 주요 계산은 기상청(국가기상슈퍼컴퓨터 센터)이 제공한 슈퍼컴퓨터 자원을 이용하여 수행되었습니다.

## GRIMs 모형의 기후 특성

송강현<sup>1)</sup>, 구명서<sup>2)</sup>, 손석우<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 비가역적기후변화연구센터

<sup>2)</sup>차세대수치예보모델개발사업단

<sup>3)</sup>서울대학교 지구환경과학부

본 연구에서는 최근 업데이트된 Global/Regional Integrated Model system (GRIMs)의 기후 특성을 확인하고자, AMIP-type 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 GRIMs 모형은 최근 v3.1(Hong et al. 2013)에서 v4.0으로 크게 업데이트되면서, 역학과 물리 과정을 포함하여 기후 값과 보조자료 등 전반적으로 모형이 개선되었다. 다만, 대부분 계절 예보에 국한된 결과였기 때문에, GRIMs의 기후 특성에 대한 논의가 추가적으로 필요하였다. 기후 특성을 분석하기 위해 모형은 1989년부터 약 20년 동안 장기 적분을 수행하였으며, 해수면 온도와 해빙 값은 최신 관측기반의 값으로 처방해 주었다. 모형의 해상도는 T126L64로, 수평으로는 약 1도 위/경도 격자 간격을 가지며, 연직으로는 최고층 0.3 hPa을 가지는 연직 고해상도에 해당한다. GRIMs가 어느 정도 기후 인자를 모의하는지 비교 분석하기 위해, 기후 모형으로 사용되고 있는 Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)에 참여한 다른 모형들과 함께 분석을 진행하였다. CMIP6 모형들과 비교하였을 때 합리적인 수준에서 대류권과 성층권에서 동서 평균 기온 및 동서바람을 모의하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 다른 모형들이 가지는 일반적인 오차(적도 상부 대류권 한랭 오차, 극 성층권 한랭 오차 등)를 유사하게 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 다만, 극지역 지표기온의 경우 다른 모형과 비교하였을 때 상대적으로 기온 오차가 크게 나타났다. 향후 보다 개선된 실험을 위해 CMIP6에서 제공하는 AMIP 실험 프로토콜에 맞춰 모형을 개선하고자 하며, 이를 반영한다면 GRIMs에서 개선된 기후 특성을 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

※ 사사: 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1C1C2006868).



---

**세션  
03**

**기후예측  
신기술**



## 기계학습 기반 특이 기상 예측

임정호, 박수민, 손보경, 유철희, 조동진, 이연수, 한대현  
울산과학기술원(UNIST)

본 발표에서는 최근 다양한 연구 분야에서 활발하게 이용되고 있는 기계학습에 대해서 기상/기후 분야 예측 기법으로써의 활용방안과 그 가능성을 사례 연구를 통해 살펴보고자 한다. 기계학습은 기상/기후 분야 예측에 일반적으로 세 가지 형태로 사용될 수 있다. 첫 번째는 전통적으로 사용되고 있는 수치역학모델 결과를 개선하는 툴로써 활용될 수 있다. 많은 연구에서 기계학습을 통해 수치모델 결과를 어느 정도 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다. 두 번째는 현장관측 및 재분석자료를 기반으로 학습을 통한 기상/기후 예측에 활용될 수 있다. 이러한 방법은 다량의 시계열 공간 데이터를 필요로 하고, 매우 인텐시브한 학습을 필요로 한다는 점에서 아직 연구가 매우 활발한 상황은 아니지만, 최근 들어 몇몇 연구에서 시도가 되고 있다. 마지막으로 수치모델 내부에서 여러 파라미터의 최적화에 기계학습을 활용하는 방법이 있으나 이는 수치모델 자체를 재구성해야 하는 문제로 아직 제대로 시도되고 있지는 않다. 또한 첫 번째와 두 번째 방법을 결합한 형태도 가능하며 단시간 내에 모델의 퍼포먼스를 개선하는 데에 적합한 방법으로 볼 수 있다. 본 발표에서는 사례 연구로서 크게 기계학습 중 딥러닝 기반의 가뭄예측, 폭염(기온)예측, 집중호우 예측 등을 소개하고 향후 수치예보모델과 기계학습의 시너지를 극대화할 수 있는 방법에 대해서도 간략하게 언급하고자 한다.

# 현업 계절 예측 성능과 활용성 제고를 위해 실험중인 새로운 방법들

김원무

APEC기후센터

에이펙기후센터는 정기적으로 제공되는 다중모델앙상블 기반의 고품질 계절 예측 정보를 포함한최신의 과학적 지식과 혁신적인 기후 예측 기술을 제공하여 회원국들의 사회-경제적 번영을 높이는 데 기여하고 있다. 그러나, 다중모델앙상블의 기초가 되는 수치 모델의 바이어스와 불확실성, 그리고 낮은 해상도 등으로 인하여, 사용자가 이해하기 쉬운 현업 계절 기후 예보를 제공하기 위해서는 예측 정보에 대한 상당한 후처리가 필요하다. 이 발표를 통해서 에이펙기후센터에서 다중모델앙상블 기반 계절 예측 정보의 예측 성능과 활용성을 높이기 위해 실험중인 다양한 접근 방법에 대해 공유하고자 한다.

전문가 가이드에 의한 계절 예측 정보 후처리 시스템인 ESPreSSOv3는, 전문가의 지식과 경험을 직접 활용해 다중모델앙상블 결과를 후보정하여 우리나라 맞춤형 계절 전망을 생산하는 ESPreSSOv1-2의 최신 버전이다. 새로운 ESPreSSOv3는 잠재 예측 인자의 변수와 지역에 대한 전문가의 개략적인 가이드를 기반으로 위도, 대륙-해양, 영향반경 등을 고려하여 다중모델앙상블 결과로부터 우리나라에 최적화된 예보를 생산한다. ESPreSSOv3는 확률 예측, 과거 예측-관측 기록 및 검증 정보, 권역별 예보, 기후 전망에 대한 개념도 뿐만 아니라 기후 전망, 예측 인자의 활동과 우리나라 관련성, 그리고 예측 성능에 대한 자연어 요약도 함께 제공하여 사용성을 높이고자 하였다.

또한, 다양한 인공 지능 알고리즘을 활용하여 현재 개발중인 지역 맞춤형 후처리 시스템의 예측 성능을 확보하고자 노력하고 있다. 예를 들어, 실험중인 아키텍처 중 커스텀 변분 인코더-디코더 기반의 모형은 인코더를 통해 다중모델앙상블 예측 결과와 함께 모델 혹은 관측에서 추출한 주요 기후 인자(즉, 예측된 엘니뇨-남방 진동과 인도양 쌍극자 지수 및 관측된 해빙과 눈-덮임 지수 등)로부터 주요 시그널을 추출하고, 디코더를 통해 이를 실제 기후 현상에 맞게 복원하는 방식으로 구성되어있다. 베이지 합성곱 신경망을 활용한 비슷한 방법론이 기후 변화에 취약한 태평양 도서국을 위해서도 개발되고 있는데, 이러한 확률론적인 접근을 통해 데이터의 특성에 포함된 논리적 불확실성(aleatoric uncertainty)뿐만 아니라 모형 파라미터 추정에 포함된 인식적 불확실성(epistemic uncertainty)에 대해서도 고려하고자 한다. 기후 예측 정보의 후처리에 인공 지능 알고리즘을 적용하는 기술은 여전히 미세 조정과 추가 맞춤화가 필요한 단계이나, 일부 원시 결과를 통해 향후 발전 가능성을 가늠해볼 수 있다.

자료로부터 의미를 추출해내는 신기술을 도입하기 위한 가장 큰 걸림돌은 독립적인 기후 자료의 양이 부족하다는 점인데, 전이 학습을 통한 수치 모델 장기 적분 결과 혹은 다중 모델 및 관측 자료의 활용 등을 통해 일부 극복이 가능한 것으로 보인다. 이 워크숍을 통해 이와 관련한 다양한 분야의 경험과 통찰을 공유할 수 있길 희망한다.

# 근지표면 온도 예측성이 가뭄 계절적 예보에 미치는 영향: 미국의 사례연구

감종훈

포항공과대학교 환경공학부

가뭄의 계절적 예측성을 개선하기 위해서는 대기-지면-해양의 상호 작용이 현실적으로 모의할 수 있는 지구 기후 예보 모델의 개선이 필수적이다. 제한적인 기후 예보 모델의 예측성으로 인하여 다중 기후 모델들의 다중 앙상블 계절 예보 시스템이 제안되었다. 2008년에 제안된 북미 다중 모델 다중 앙상블 시스템(North American Multimodel Multiensemble System; NMME)은 다양한 모델 개발팀의 참여로 현재까지 운영되면서 계절적 예측성 연구에 큰 이바지를 하였다. 본 연구에서는 NMME 프로젝트에 참여하는 기후 예보 모델들의 북방 여름철 근지표면 온도와 강우량의 예측성을 진단하고 이들의 상관 관계의 강도를 관측데이터와 비교 분석하였다. 대부분의 NMME 모델들에서는 관측데이터에서 보다 강한 음의 상관 관계를 보였다. 이런 근지표면 온도와 강우량의 강한 상관 관계로 우수한 근지 표면 온도 예보는 각각의 해마다 그 역할이 다른 것을 발견되었다. 예를 들어 가뭄 여름에는 우수한 근지표면 온도 예보가 강우량 예보에 도움이 되고 강우량이 많은 여름에는 우수한 근지표면 온도 예보는 오히려 강우량 예측성을 제한하게 된다. 따라서 기존의 기후 예보 모델들에서 근지표면 온도와 강우량의 상관관계를 사실적으로 나타낼 수 있도록 모델 개선이 요구된다. 마지막으로 관측데이터와 기후 모델데이터에서 태평양과 대서양의 해수면 온도와 미국의 북방 여름철 날씨의 관계를 비교하였다. 근지표면 온도와 강우량에 대한 제한적 예측성에 비해, 대부분의 NMME 기후 예보 모델들에서 해수면 온도의 예측기술은 우수함을 발견하였고 몇몇 모델들에서는 미국의 북방 여름철 기후에 영향력을 주는 대서양과 태평양의 지역까지 잘 모사하는 것을 발견하였다. 따라서 본 연구는 보다 우수한 기후 예보 기술을 위해 앙상블 평균 예보값만이 아닌 NMME의 계절적 예보를 선택적인 사용이 필요함을 제안하였고 앞으로 북미 대륙 뿐만 아니라 유럽-아시아의 계절적 이상 기후 예측성에 대한 연구 필요성을 강조하였다.

## 역학-통계모형 결합을 통한 3-6주 기온 확률예측 성능 개선

김민주<sup>1)</sup>, 유창현<sup>1)</sup>, 최정<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>이화여자대학교 기후·에너지시스템공학과

<sup>2)</sup>서울대학교 지구환경과학부

본 연구에서는 계절 내 예측 성능 개선을 위해 Perfect Prognosis (PP) 방법을 기반으로 합성장 기반 확률 통계 모형과 역학 모형에 의하여 예측된 기후 모드를 결합하였다. 결합 모형을 통해 북반구 겨울철의 계절 내 기온을 예측 성능을 평가하고, 기존의 통계 및 역학 모형의 예측 성능과 비교하였다. 모형 설계를 위해 유럽중기예보센터(ECMWF)의 앙상블 예측 시스템에서 과거기후모의(hindcast)자료로 북극 진동(AO)을 산출하고, 역학 모형에서 산출된 AO의 초기 위상을 통계 모형의 예측 인자로 채택하였다. 결합 시 사용된 통계 모형은 AO와 지표 기온 사이의 경험적 관계를 바탕으로 하는 위상 모형을 사용하였다. 예측은 주별로 1-6주의 선행 시간에 대해 수행되었다. 단일 통계 모형과 비교한 결과 모든 선행 시간에 대해 북반구의 전반적인 예측 성능과 신뢰도가 향상되었다. AO를 예측하는 역학 모형의 예측 선행 시간이 길어짐에 따라 결합 모형의 성능이 크게 향상되었고, 3주 예측된 AO를 예측 인자로 사용한 결합 모형이 가장 높은 예측성능을 제공하였다. 특히 유라시아 지역의 예측 성능을 ECMWF 앙상블 시스템의 결과와 비교하였을 때, 4주의 선행 시간에서 결합 모형이 비교적 높은 예측 성능을 보였다. 이는 겨울철 중위도 기온과 AO 사이의 강한 연관성과 앙상블 예측 시스템의 높은 초기 예측 성능에서 기인하였다. 본 연구에서 계절 내 시간 규모에서 설계된 통계-역학 결합 모형을 북반구 전반에 걸쳐 평가함으로써 다양한 기후 변동성과 통계적 연관성, 그리고 역학 모형의 결합을 통해 지역 및 예측 변수에 따른 활용 가능성을 제시한다.



세션  
04

기후예측 정보 전달  
현재와 미래



## 기후 정보 전달 방향에 대한 논의

김세현  
JTBC

이 발표에서는 전달자의 입장에서 언론에서 다루는 기후 변화의 현재 상황과 앞으로의 방향에 대해 논의하고자한다. 언론은 시의성에 민감하기 때문에 주로 극한 기상이 발생하는 여름과 겨울에 기후 변화와 온난화에 대해 다루는 경우가 많다. 최근에는 온라인을 통한 기사 전송이 활발한 만큼 시의성을 떠나 기후와 관련해 온라인을 통한 기획 및 연재를 하는 언론사도 늘어나는 추세이다. 하지만 기후변화와 온난화 전달에 있어서 천편일률적인 면이 있다. 단순히 현상 전달이나 앞으로의 전망에 대한 내용이 대부분이다. 지난해부터 이어지고 있는 코로나 상황과 비교했을 때, 이런 전달은 다소 우려되는 부분이 있다. 코로나는 일상을 송두리째 바꾸어버렸고 무기력증을 동반한 ‘코로나 블루’가 생기기도 했다. 하지만 사회적 거리두기라는 참여와 함께 백신 공급이라는 희망적인 부분이 있기에 사람들이 버티며 이겨 내고 있다. 반면, 기후 변화에서는 그러한 내용을 찾아보기 어려운 상황이다. 개인의 행동이 기후 위기 시대에 대한 대응의 시작이긴 하지만, 개인의 차원에서 해결되기는 어려운 문제인 만큼 해결책이나 방안도 동시에 전달되어야 할 것으로 보인다. 기후 변화로 인한 극단적인 기상 현상은 점점 더 빈번해지고 있고 찾아질 전망이다. 사람들이 인식하는 기후 변화에 있어서 희망적인 부분 없이 위기와 그 강도만을 강조한다면 사람들은 피로가 쌓이고 관심을 두지 않고 외면할 가능성이 높다. 기후 변화는 더 이상 개인이 아닌 전 인류의 생존과 관련된 문제이기 때문에 적극적인 참여를 이끌어내는 부분이 필요할 것으로 보여 진다.

## 탄소중립과 철강 산업의 대응

김정인<sup>1)</sup>, 김상용<sup>1)</sup>, 유경태<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>중앙대학교 경제학부, <sup>2)</sup>중앙대학교 산학협력단

본 연구에서는 탄소중립과 철강 산업의 대응이라는 주제를 통해 탄소 중립 배경과 국내외 r&d 기술 동향 및 산업계와 철강 산업의 동향을 살펴본 후에 향후 철강 산업의 탄소 중립 방향에 대하여 알아보고자 한다. 이를 위해 본 보고서에서는 국내외 r&d 기술 동향을 살펴보고 국내외 기업의 탄소중립현황과 산업 및 금융동향을 통해 주요 산업 탄소중립 경로와, 선진국의 녹색금융 정책을 통해 철강산업의 대응 방안 및 저탄소 경제로 나아가기 위한 로드맵 등 2050년까지 탄소 제로를 달성하기 위한 분야별 기술 동향을 살펴보고자 한다.

지구는 산업화 이전 대비 약 1.0°C 온도가 상승하였으며, 현재 속도로 지속되면 2030~2050년 사이 1.5°C에 도달할 것으로 보이며, 1.5°C 달성을 위해 온실가스 한계 감축 비용은 2°C 달성 때 보다 3~4배 높을 것으로 추정 된다(기후변화1.5°C 특별보고서 '18.10). 탄소중립은 인간의 활동에 의한 온실가스 배출을 최대한 줄이고, 남은 온실가스는 흡수, 저장, 이용, 제거하여 실질 배출량이 0이 되는 개념으로 제로 탄소 사회로 나가는 길은 에너지 전환, 산업구조 조정, 수송, 건물 변화, 과감한 기술혁신, 재정확보, 시민교육, 공동 협력등 다양한 노력이 필요할 것이다.

영국, 독일, 프랑스, 미국, 멕시코, 일본, 캐나다등 주용국의 2050년까지 온실가스 감축 목표(LEDs)를 알아보고, 지멘스, MS사, 삼성전자, 포항제철등 국내외 기업의 탄소중립 현황등을 살펴봄으로써, 각국의 온실가스 목표와 기업의 탄소중립 노력을 통해 미래사회 변화를 예측해 보고자 한다.

국제 재생 에너지기구에서는 탄소제로 달성을 위해 2050년까지 130조 달러의 투자가 필요할 것으로 보고되고, EU도 '30년까지 연간 1천억 유로 투자를 통해 2050년까지 탄소제로 유럽 그린 뉴딜을 추진중에 있음. 한국은 재생에너지 그린뉴딜 소요재원에 141조로 추산하고 있다.

선진국은 녹색 금융을 위한 정책 금융의 역할을 강조 하고 있으며, 독일의 특별에너지 기후기금, 영국투자 은행의 녹색개발은행계획발표, 호주 맥쿼리, 유럽연합 EIB 기후은행 전환등 기존 정책 금융기관의 기능을 개편하고, 저탄소 자금 조달 칩 탄소중립 달성을 위한 다양한 지속가능 금융정책을 실시하고 있다.

국내 산업별 이산화탄소 배출 비중은 철강 24%, 시멘트 18%, 화학 12%, 플라스틱 6%, 제지 4%, 기타, 33%등 강철 1톤이 생산될 때 1.85톤의 이산화 탄소가 배출되며, 산업 부문의 2050년 온실가스 배출은 2017년 대비 52~68%이 가능할 것으로 추정된다.

철강 산업은 온실가스 고배출 산업으로서 전 세계적으로 환경/기후 문제 해결에 있어서 주된 관심 산업이다. 철강 산업의 이산화탄소 배출 규모는 세계 7% 정도, 산업 부문에서 24% 정도를 차지 하고 있으며, 유럽 철강 산업은 2030년에 현 수준의 약 30% 추가 감축 계획을 가지고 있고, 일본은 철강업체 탄소 제

로화 시기를 2100년 정도로 보고 있다, 중국도 설비수준 향상, 해외자원 확보와 자급률 향상, 녹색저탄소 재활용, 철강생산 능력 감축 등 다양한 성장 추진 가이드를 통해 경쟁력을 확보해 나아가고 있으며. 이밖에 많은 나라들이 2050년까지 탄소 중립을 선언하는등 탄소 배출을 줄이기 위한 노력과 수소환원제 사용등 다양한 노력을 기울이고 있다.

이를 위해 철강 산업의 대응방향은 기후변화기금(가칭) 설립을 통하여 전력산업 기반 기금 5조, 기후변화 유상할당(3%), 지역자원 시설에 약1조등이 필요하며, 효율적인 운영과 연구를 통해 저탄소 기술과 연계하는등 연구개발 지원 기금이 필요하며, 단기수익 극대화, 위험을 회피하는 민간 상업 금융이 상대적으로 위험이 큰 장기, 대규모분야 투자 가능한 공공정책 금융을 추진하는등, 정부와 민간 r&d 역할 재편을 통해 민간 중심 기술 정책을 유도함으로써 원천, 기초기술, 응용기술, 상업화 기술 개발에 중점을 두어야 할것으로 보인다.

이처럼 철강산업은 온실가스 감축을 통한 경쟁력 확보와 산업계 역시 친환경, 저탄소 구조로 전환에 중요함을 인식하고 있다 따라서 온실가스 감축 주체인 철강 산업 주체들의 온실가스 배출 개선과 사회적 감축 효과 산정 표준화 및 제도 반영등을 통해 국내 환경, 기후규제의 보완이 시급할 것으로 보인다.

※ 사사: “본 연구는 환경부「미세먼지관리특성화대학원지원사업」의 지원으로 수행되었습니다.”

# 클라우드 플랫폼 기술을 이용한 APCC 기후서비스 개발

이현록, 신지현, 김상철, 정주형  
APEC기후센터

APEC 기후센터(APCC)에서는 국내를 포함한 아시아태평양 지역에서 기후정보가 좀 더 가치 있게 활용될 수 있도록 기후정보의 생산, 가공, 제공을 목적으로 다양한 기후정보서비스를 개발하여 온라인을 통해 서비스하고 있다. 다양한 사용자의 요구 반영을 목표로 한 기후서비스 발전 방향은 APCC 기후정보서비스가 양적질적으로 확대되는 성과를 달성하였으나 그 이면에는 유사 기후정보서비스의 중복 개발, 자원 및 운영 효율성이 감소하는 한계가 발생하였다. 이런 한계점 극복을 위해 기후예측자료 및 그 활용 기술을 중심으로 유사 기후정보서비스들을 단계적으로 통합하고, 자원 및 운영비용의 절감이 가능한 최신 클라우드 기술 기반의 플랫폼 서비스로의 전환을 추진해 나가고 있다. 해당 플랫폼은 과학기술정보통신부와 한국지능사회진흥원 주도로 개발된 국산 개방형 클라우드 플랫폼인 '파스-타'를 활용하여 기존 전통적인 방식으로 개발된 APCC 기후정보서비스들을 하나의 플랫폼 기반으로 구축하였다. 해당 기후서비스 플랫폼은 클라우드 기술의 장점을 반영하여, 사용자 관리, 자료 처리 및 패키징, 자료 다운로드, 계절예측자료 생산, 계절예측 검증 자료 생산, 기후자료 좌표 가공 등의 서비스들로 세분하였고, 각 서비스는 목적에 따라 유기적으로 재사용 및 이합 집산할 수 있는 형태로 개발되었다. 일반 사용자들은 APCC 기후서비스 플랫폼 웹 서비스를 통해 쉽고 편하게 자료를 요청 및 다운로드, 기후예측자료의 생산 및 가공을 수행할 수 있으며, 좀 더 고도화된 분석을 수행하는 기상/기후 전문가를 위해서는 APCC 기후서비스 플랫폼 공개 응용프로그래밍 인터페이스(Open API)를 이용하여 자신의 프로그램에 자료 다운로드 코드를 삽입하거나, 제공되는 스크립트를 활용하여 연구 장비로 직접 다운로드를 수행할 수 있다. 또한 해당 플랫폼은 성능평가 도구를 이용하여 대규모 사용자에게 대한 서비스 안전성을 확인하였고, 해당 평가를 바탕으로 플랫폼 자동 확장 기능(Auto-Scaling)의 임계치를 설정하여 보유 하드웨어 성능의 최대치까지 서비스가 원활하게 제공될 수 있는 가용성을 갖추고 있다. 향후에는 해당 기후서비스 플랫폼에 계절예측 상세화 및 기후자료처리 강화 등 서비스를 확대 적용하고 사용자가 기후정보를 좀 더 적극적으로 활용할 수 있도록 API, 스크립트 기능을 강화함과 동시에 지속적인 사용자 워크숍을 추진할 예정이다.

※ 사사: 이 연구는 APCC 연구로 수행되었습니다.

# 메타데이터와 데이터 간 상호 연계성에 기반한, 통합형 기후예측 정보 모델 구축/활용 방안 및 포스트 코로나 아태지역 경제협력에 대한 시사점

박지은

Terra.do

이 연구는 국제적인 포스트 코로나 사회경제회복과정을 고려하여, 메타데이터와 데이터 상호관계에 기반한 미래 기후예측 정보 모델 구축 및 활용 방안을 모색하고, 향후 아태지역 경제협력에 대한 시사점을 제시한다. 첫 번째 파트에서는 기후 데이터 국내외 모델링 현황 및 활용 한계를 파악하여 효과적인 기후예측 정보 전달 및 활용을 위해서 극복해야 할 과제들을, 메타데이터 구축 가능성 및 데이터 상호 연계성 중심으로 살피고; 두 번째 파트에서 통합형 기후예측 정보 모델의 개념과 구축 및 활용 방안을 제안하며; 세 번째 파트에서는 통합형 모델이 포스트 코로나 사회경제 회복 및 지속가능개발을 가속화함으로써 가지는 의미와 긍정적인 역할을 조명 한 후; 네 번째 파트에서는 특히 아태지역 경제협력에 대한 시사점을 다루었다. 이 연구결과는 기후 데이터 관리, 분석 및 커뮤니케이션이 사회경제적 가치를 창출할 수 있는 방향을 모색하는 기후학자들에게 특히 도움이 될 것이다. 또한 빅데이터 시대의 데이터 홍수 속에서도, 사회적 가치 창출 및 극대화가 가능한 기후 정보 관리 및 전달에 이바지할 수 있을 것이다. 공공데이터 플랫폼의 구조적 한계 극복 방안을 제시함으로써 지속가능개발 가속화, 불평등 극복 및 기후정의 실현 방안에 이바지할 수 있으며, 장기적으로는 향후 기후예측 정보의 통합형 관리 및 전달 시스템에 대한 방법론적 선례가 되어, 기후정보의 사회경제적 활용도에 의미가 있을 것이다.

※ 사사: 이 연구는 독립 연구로 수행되었으며, Terra.do 혹은 UNDP 측의 의견을 대표하지 않습니다.





---

# 포스터



# 포스터 발표

연번	발표제목	이름	소속기관	소속부서
1	국립해양조사원의 장기 해수면 변동 감시·분석과 미래 전망 소개	정광영	국립해양조사원	해양과학조사 연구실
2	CMIP6 KIOST-ESM을 통해 살펴본 한반도 주변 해역 해양열파 발생 전망	박군도	한국해양과학기술원	해양순환 연구센터
3	한국해역의 아열대성 착생외편모류 변성과 기후변화	이원호	군산대학교	해양생물 공학화
4	역학적 규모 축소법을 사용한 기후변화 시나리오에 따른 한반도 주변 해수면 상승 모의	김용엽	서울대학교	지구환경 과학부
5	기후변화 영향 및 취약성 평가의 중장기 발전 방향	홍제우	한국환경정책·평가연구원	국가기후변화 적응센터
6	아태지역의 기후변화 연구를 위한 국제협력	명수정	한국환경정책·평가연구원	물국토 연구본부
7	로스비 파동 이론을 활용한 동아시아 여름철 몬순 강수의 경년 변동성 이해	손준혁	한국해양과학기술원	해양재난재해 센터
8	현업기후예측시스템의 계절내 잠재 태풍 예측성 분석	김태형	울산과학기술원	도시환경 공학과
9	1990년대 전·후시기 동아시아 여름철 극한 기온 발생요인의 변화	이용한	한양대학교	해양융합 과학과
10	겨울철 북미 표층 기온에 영향을 미치는 북태평양 제트의 변동 특성 변화 연구	송세용	한양대학교	해양융합 과학과
11	새로운 표준 기후 평년 시기 동아시아 겨울 기온과 태평양 십년주기 진동 간의 상관성 변화 연구	홍진실	한양대학교	해양융합 과학과
12	겨울철 동아시아 몬순 특성에 대한 북서·북중 대서양 해양-대기 상호 작용의 중요성	마승주	한양대학교	해양융합 과학과
13	2020년 동아시아 여름 강수에 대한 열대 인자의 영향	김선용	연세대학교	비가역적기후 변화연구센터

연번	발표제목	이름	소속기관	소속부서
14	북극해 온난화가 여름철 동아시아 폭염 발생에 미치는 영향 연구	김다슬	포항공대	환경공학부
15	CMIP6에서의 기후 변화에 따른 중앙 태평양 엘니뇨 발생의 증가에 대한 연구	신나연	포항공대	환경공학부
16	미래 기후 북극해 식물성플랑크톤	노경민	포항공대	환경공학부
17	이산화탄소 강제력에 대한 육상 탄소 순환의 가역성과 이력현상에 대한 평가	박소원	포항공대	환경공학부
18	이산화탄소 제거 실험에서 북극 기후변화에 대한 AMOC 내부 변동성의 역할	오지훈	포항공대	환경공학부
19	기후모형에서 ENSO의 장주기 변동을 조절하는 요인	김건일	포항공대	환경공학부
20	CREDYT : 현업 주평균 예측 통합 평가프레임	이윤영 김가영	APCC	예측기술과
21	선제적 대응을 통한 APCC 다중모델 앙상블 (MME)의 기후예측 정확도 향상	임창목 양유빈 정다은	APCC	예측운영과
22	기계학습모델을 활용한 이상기후 확률전망 생산 기법 개발	이진영	APCC	기후분석과
23	The ESPreSSOv3 (Expert Seasonal Prediction System for operational Seasonal Outlook)	김원무 여새림	APCC	기후분석과
24	APEC기후센터의 ESGF 데이터 노드를 활용한 CORDEX동아시아 자료 서비스	한정민 최재원	APCC	기후분석과
25	사용자 맞춤형 계절 예측 자료 추출 및 가공 웹 서비스	한정민 임창목	APCC	기후분석과
26	클라우드 기반 계절예측 및 관측자료 합성서비스	한정민 임창목	APCC	기후분석과

# 국립해양조사원의 장기 해수면 변동 감시·분석과 미래 전망 소개

정광영<sup>1)</sup>, 이은일<sup>1)</sup>, 변도성<sup>1)</sup>, 조양기<sup>2)</sup>, 한기종<sup>3)</sup>, 김용엽<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>국립해양조사원 해양과학조사연구실

<sup>2)</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>3)</sup>(주)유에스티21 해양부

지구온난화에 따른 기후변화와 관련하여 국제사회는 IOC, IPCC 등을 중심으로 다양한 중장기 목표를 수립하고 있으며, 우리나라는 국가기후변화적응대책을 포함한 종합적이고 체계적인 적응 방안을 모색하고 있다. 이에 발맞추어 국립해양조사원에서는 기후변화의 3대 지표 중 하나인 해수면 변동과 관련하여 적응 대응 지원을 위해 과거 해수면 높이 관측자료를 정밀 분석하여 상승 추세를 감시하고, 수치모델을 이용한 기후변화 시나리오별 미래 해수면 상승 전망에 관한 연구를 수행하고 있다. 이 연구에서는 해수면 상승 현황 파악을 위한 관측자료 분석 과정과 결과를 제시하고, 수치모델 기반의 미래 해수면 상승 전망 계획에 대해 간단히 소개하고자 한다.

우리 연안 해수면 상승을 산정을 위해 국가해양관측망의 50개 조위관측소 중 30년 이상 해수면 높이 자료가 누적된 21개 조위관측소를 선정하였고, 관측 개시일 부터 2019년까지 1시간 조위 관측자료를 활용하여 장기 시계열 분석이 가능한 L2 등급(지연모드)의 자료를 재생산했다. 자료 재생산을 위해 결측자료 보간, 잔차분석, 인접 조위관측소와의 비교분석, 수직변위 분석, 이력조사를 통한 기준 높이 통일 등 다양한 전처리 과정을 수행했다. 재생산 자료로 산정한 최근 30년(1990~2019년) 우리 연안 전체 평균 해수면 상승률은 3.12 mm/yr, 동·남·서해안 순으로 각각 3.83, 3.65, 2.57 mm/yr이었다. 최근 10년(2010~2019년)간 전 연안의 평균 해수면 상승률은 3.68mm/yr로 과거 30년 상승률의 약 1.2배 수준으로 나타났다. L2 등급으로 재생산한 자료를 최종 검토한 후 내년부터 국립해양조사원의 해양정보 제공 시스템을 통해 우리 연안의 해수면 높이 자료와 상승률 정보 등을 제공할 계획이다.

또한, 2100년까지의 해수면 상승을 전망하기 위해 지역해양기후 수치예측모델을 구축하였으며, 기후변화 시나리오(RCPs)에 따른 CMIP5 전구모델 결과를 적용하여 미래 해수면 상승 전망 자료를 생산하여 올해 초에 공식 발표한 바 있다. 향후 기 구축한 고해상도 지역해양기후 수치예측모델에 새롭게 변경된 기후변화 시나리오(RCPs-SSPs)가 적용된 CMIP6 결과를 적용하여 우리나라 연안의 상세 미래 해수면 상승 전망을 추진할 계획이다.

# CMIP6 KIOST-ESM을 통해 살펴본 한반도 주변 해역 해양열파 발생 전망

박군도<sup>1)</sup>, 박영규<sup>1)</sup>, 김영호<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국해양과학기술원

<sup>2)</sup>부경대학교

한국해양과학기술원에서는 지구시스템모델인 KIOST-ESM을 개발하여 CMIP6에 참여하고 있다. 본 연구에서는 KIOST-ESM을 통해 적분한 1850년부터 현재까지의 기후를 모사한 역사 실험(historical run)과 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오 기반의 미래 기후 예측 실험을 통해 한국 주변 해역에서의 해양열파 발생 현황 평가 및 미래 전망을 하고자 한다. 고수온은 90분위 표층 수온 어노말리 이상 나타나는 표층 수온으로 정의할 수 있으며, 이러한 고수온 현상이 일정 시간 이상 지속 되는 것을 해양열파로 정의하였다. 해양열파 발생의 특징은 빈도(frequency), 기간(duration), 강도(intensity)로 정량화할 수 있다. 역사 실험 결과를 기준으로 고수온을 정의하여, 2100년까지의 기후변화 시나리오별 한반도 주변 해역 해양열파 특성 변동을 살펴보면, 발생 빈도는 모든 시나리오에서 서서히 증가하다 2050년 이후 SSP2-4.5 및 SSP5-8.5 시나리오에서 줄어드는 것을 확인할 수 있는 반면, 기간과 강도는 시간에 따라 이들 시나리오에서 꾸준히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 한반도 주변 해역에서는 전지구 평균보다 더 강한 해양열파 강도를 확인할 수 있어 향후 기후 변화에 따른 고수온에 대한 면밀한 대응이 필요함을 알 수 있다. KIOST-ESM 외에도 시나리오 결과를 제공하는 CMIP6 모델을 통해 다중 앙상블 분석을 하여 한국 주변 해역 해양열파 특성 장기 전망의 불확실성도 평가할 예정이다.

※ 사사: 이 연구는 해양수산부 지원의 '아북극-서태평양 기인 한반도 주변 고수온 현상 규명 및 예측시스템 구축' 사업의 지원을 통해 수행되었습니다.

## 한국해역의 아열대성 착생외편모류 번성과 기후변화

이원호<sup>1),2)</sup>, 김형섭<sup>1)</sup>, 오미령<sup>1)</sup>, 장건강<sup>1)</sup>, 박종우<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>군산대학교 해양생물공학과, <sup>2)</sup>(주)지오시스템리서치, <sup>3)</sup>수산과학원 갯벌연구소

Nie와 Wang(1944)은 신속 *Sinophysis*을 기재하여, 극동아시아 해역에서는 최초로 저서성 외편모류에 대한 연구업적을 남겼다. 1981년에 시작된 일본 연안역에서 저서성 외편모류의 분류 및 독성에 관한 연구는 러시아 Ussuriiskii 만의 *Ostreopsis*에 관한 2010년의 보고로 이어졌다. 저서성, 특히, 착생성 외편모류(epiphytic dinoflagellates, EPDs)의 출현에 대한 한국해역 최초의 2009년 조사(Kim 등 2011)를 기점으로 하여, 한국 연안의 EPD 모니터링, 배양종주 기반의 분류학 및 생태생리학적 연구, 한국산 EPD 종주의 대량배양체를 이용한 신규성 해양천연물 탐색 및 응용 등에 이르는 일련의 최신연구로 발전해 나가고 있다.

다섯 가지 주요 속의 EPD 가운데, *Ostreopsis*와 *Gambierdiscus* 등의 두 속은 이미 2009년부터 제주 연안역에 널리 분포하여, 이들의 잠재적인 독성 문제가 특별한 관심의 대상이 되었다. 비록 현장 생물량이 유럽 지중해 또는 기타 아열대역에 비해 아직은 그리 높지 않은 편이지만, 기후변화에 따라 평균수온이 상승하는 추세로 전환될 경우, 우리 해역에서도 이들 두 속이 급속하게 번성할 수 있다. 단순하고도 명료한 기후변화의 지시자로 응용할 수 있기 때문에, 이들 *Ostreopsis*와 *Gambierdiscus* 농도분포 곡선의 시공간적 추이를 Eulerian 및 Lagrangian 방법론으로 장기-감시해야 할 것이다. 그 첫 걸음으로 그리 어렵지 않은 일은, 국민과 해양생태계의 건강을 위한 과학적 노력의 하나로서, 한국해역에 EPDs 생태계 추적을 위해 설정한 3-4개 고정점에 대하여 최소한 30년 이상의 시계열적 모니터링 사업을 국제적 수준으로 과감하게 착수하는 것이다.

## 역학적 규모 축소법을 사용한 기후변화 시나리오에 따른 한반도 주변 해수면 상승 모의

김용엽<sup>1)</sup>, 조양기<sup>1)</sup>, 김봉관<sup>1)</sup>, 이은일<sup>2)</sup>, 변도성<sup>2)</sup>, 정광영<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 지구환경과학부/해양연구소

<sup>2)</sup>국립해양조사원 해양조사연구실

전지구 해양기후 모델들을 사용하여 지구온난화로 인한 해수면 예측이 많이 이루어지고 있다. 그러나 대다수의 전지구 해양기후 모델들은 낮은 수평 해상도를 가져 한반도 주변의 복잡한 지형을 표현하는데 한계가 있다. 이로 인해 전지구 해양기후 모델들은 우리나라 주변 중요한 해류들의 흐름을 정확하게 재현하기 어렵다. 전지구 해양기후 모델의 낮은 수평 해상도로 인한 한계를 보완하기 위해 고해상도 지역 해양모델에 역학적 규모 축소법을 적용하였다. 수치모델은 지역 해양 기후변화 연구에 많이 활용된 모델인 Regional Ocean Modeling System (ROMS)을 사용하였다. 미래 예측을 위한 고해상도 지역 해수면 예측 모델의 최적 경계값을 찾기 위해 CMIP5 historical 전구 기후모델 자료들을 평가하고 검증하였다. 평가 결과 해수면 모의 성능이 좋았던 IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR과, 해수면 및 표층수온 모의 성능이 좋았던 NorESM1-M, MPI-ESM-LR 전구모델의 결과를 고해상도 지역 해양모델의 경계장으로 사용하였다. 고해상도 지역 해양 모델을 수행하여 CMIP5 기후변화 시나리오에 따른 미래 한반도 주변 해수면 상승을 모의하였다. 모의한 지역 모델들의 기후변화 시나리오에 따른 해수면 상승 결과와 CMIP6 시나리오를 이용한 연구계획을 소개한다.

## 기후변화 영향 및 취약성 평가의 중장기 발전 방향

홍제우, 송영일, 정희철, 유인상, 유명수, 구혜윤

한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터

미래 기후변화 시나리오는 기후변화 위험도(risk) 평가에서 위해성(hazard) 정보로 활용되어, 적응 정책의 수립과 추진의 중요한 과학적 근거로 활용된다. '기후변화 취약성 평가지원도구 시스템'(VESTAP)은 57개 평가항목에 대한 기후변화 취약성(vulnerability) 평가 결과를 지원하여, 광역 및 기초지자체의 기후변화 취약성 우선순위 정보와 전국 위험지도 구축에 기여하고 있다. 기후변화대응 환경기술개발사업('14-21)에서 개발한 '부문별 기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형'(MOTIVE)은 66개 항목에 대한 기후변화 영향(impact) 예측 결과와 부문별 개발 모형을 제공하여 적응대책 수립에, 더욱 면밀한 미래 예측 정보를 제공하게 하였다. 본 발표에서는 현재 활용되고 있는 기후변화 영향 및 취약성 평가도구를 소개하고, 제3차 국가 기후변화 적응대책('21~'25)에 수록된 향후 5년간의 개선 계획 및 중장기 발전 방향에 대해 소개하고자 한다.

※ 시사: 본 논문은 한국환경정책·평가연구원에서 환경부의 수탁과제로 수행된 「기후탄력성 제고 기반 마련(2021-001-03)」의 연구결과를 기초로 작성되었습니다.

## 아태지역의 기후변화 연구를 위한 국제협력

명수정

한국환경정책·평가연구원

아태지역의 전 지구적 변화에 대한 연구 네트워크 APN(Asia-Pacific Network for Global Change Research)는 아시아 태평양 지역의 지구적 변화와 관련된 정책 중심의 연구 및 역량 강화 활동을 장려하는 정부 간 네트워크로 1996년 3월에 창립되었다. 현재 호주, 방글라데시, 부탄, 캄보디아 등 아태지역 총 22개의 회원국을 가지고 있는 APN은 우리나라를 비롯하여 일본, 미국 및 뉴질랜드 정부로부터 재정 지원을 받으며 아태지역 내 국가 간의 연구협력을 지원해오고 있다. APN의 전 지구적 변화와 관련된 다양한 주제를 다루는데, 주요 분야는 1)기후변화, 2)생물다양성과 생태계, 3)대기, 토지 및 해양과 연안, 4) 식량과 물과 에너지, 5) 리스크와 회복탄력성, 그리고 인간에 대해 다루고 있다. 이중 기후변화는 가장 중요하게 다루고 있는 연구 주제이다. APN의 주요 연구 프로그램은 Collaborative Regional Research Programme (CRRP)과 Capacity Development Programme(CAPaBLE)이 있으며, 또한 젊은 연구자들을 위한 연구기회 등 아태지역 내 연구자들간의 네트워크 강화와 연구 지원을 통해 전 지구적 변화로 인한 문제를 해결하는데 기여하고자 노력하고 있다. APN은 아태지역 내 이웃 국가 간의 연구와 선개도국 간의 연구협력을 독려하고 있다. 기후변화는 APN에서 가장 중요하게 다루고 있는 연구주제이며, 기후변화 문제 해결을 위해서도 국제 연구협력의 중요성이 높은 만큼 APN을 활용한 기후변화 분야 국제협력을 고려할 만하다. 또, 개도국 회원국들의 기후변화에 대한 공동 연구 수요가 높아 우리나라의 기후변화 연구자들이 관심을 가지고 국제공동연구를 추진할 기회로 활용하는 것을 고려할 필요가 있을 것이다.

# 로스비 파동 이론을 활용한 동아시아 여름철 몬순 강수의 경년 변동성 이해

손준혁<sup>1)</sup>, 서경환<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국해양과학기술원

<sup>2)</sup>부산대학교

이 연구에서는 동아시아 여름철 몬순을 발생시키는 주요 기작인 지형에 의해 강제된 정상 로스비 파동 이론을 활용하여 동아시아 여름철 몬순 강수의 경년 변동성을 분석하였다. 동아시아 여름철 몬순 강수는 매우 강한 경년 변동성을 가지고 있으며, 전지구적으로 다양한 기후 인자로부터 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 하지만 이러한 선행연구들의 단점은 지구온난화에 의한 기후변화 영향을 고려하기 힘들다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 동아시아 여름철 몬순 발생기작과 관련된 근원적인 이론을 바탕으로 동아시아 여름철 몬순의 경년 변동성을 이해하고자 하였다. 동아시아 여름철 몬순은 티벳 고원의 서쪽에서부터 불어들어오는 서풍이 티벳고원을 타고 상승하면서 발생시키는 정상 로스비 파동에 의해 영향을 받는다. 티벳고원의 동쪽으로 저기압과 고기압을 순차적으로 발생시키는데, 이 저기압과 고기압 사이에서 발생하는 남풍이 남쪽으로부터 수증기를 북쪽으로 수송하여 몬순 강수밴드를 발생시키게 되는 것이다. 이러한 로스비 파동의 위상은 티벳 고원의 서쪽에서 불어오는 서풍의 강도에 의해 변화하게 되는데, 서풍의 강도가 강할 경우 몬순 강수 밴드는 동쪽으로, 서풍의 강도가 약할 경우 강수밴드가 서쪽으로 이동하여 발생하게 된다. 여기서 티벳 고원의 서쪽에서 불어오는 서풍의 강도는 인도양 해수면 온도 변화에 의해 영향을 받아 변동할 수 있고, 지구온난화에 따른 남북방향 온도 경도 변화에도 영향을 받아 변동할 수도 있다.

# 현업기후예측시스템의 계절내 잠재 태풍 예측성 분석

김태형, 차동현, 윤동혁

울산과학기술원 도시환경공학과

태풍은 사회경제적으로 막대한 피해를 입히는 대표적인 자연현상으로 북서태평양에서 매년 25개 내외의 태풍이 발생하며, 이 중 우리나라는 매년 3~4개의 태풍에 직·간접적으로 영향을 받고 있다. 2019년에는 평년보다 2배 이상 많은 7개의 태풍이 한반도에 영향을 미쳤으며, 2020년은 북서태평양 태풍 발생수는 평균보다 감소했음에도 불구하고 3개의 강한 태풍이 한반도에 피해를 주는 등 태풍으로 인한 피해 위험성이 점차 높아지고 있다. 태풍과 같은 이상기후를 선제적으로 대비·대응하기 위해서는 2주~2개월에 걸치는 계절내 시간규모(Subseasonal-to-Seasonal; S2S)에 대한 예측성이 강조되고 있다. 따라서 선제적 대응을 통한 우리나라 태풍 피해 최소화를 위해서는 기상청의 현업기후예측시스템(Global Seasonal forecast system ver.5; GloSea5)의 계절내 태풍 예측 오차에 대한 역학/물리 과정 기반 원인 파악이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 현업기후예측시스템(GloSea5)의 계절내 잠재 태풍 예측 오차와 대규모 기후 현상 모의 특성을 분석하여 잠재 태풍 예측 오차에 대한 원인을 파악하고자 한다. GloSea5의 모델 자료와 관측자료 그리고 재분석장을 비교·분석하여 북서태평양 계절내 태풍예측성 및 기후인자 모의성능을 평가하였다. 북서태평양 태풍 활동에 영향을 미치는 대표적인 대규모 기후 현상인 ENSO (El-Nino Southern Oscillation) 모의 결과와 계절내 태풍예측 결과를 분석하였고, 20세기 대표적인 강한 라니냐 해이자 태풍 발생 빈도가 평년에 비해 현저히 감소한 1998년을 선정하여 분석을 진행하였다. GloSea5는 1998년 태평양 해수면 온도를 차갑게 모의하여 북서쪽으로 치우친 태풍 발생 위치와 평년보다 적은 태풍 발생 빈도를 현실적으로 모의하지 못하였다. GloSea5의 해수면 온도 모의 오차와 태풍 발생 위치와의 연관성에 대한 심층 분석 결과를 추가적으로 발표할 것이다.

※ 사사: 이 연구는 기상청 <「기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발사업」>(KMI2020-01211)의 지원으로 수행되었습니다.

# 1990년대 전·후시기 동아시아 여름철 극한 기온 발생요인의 변화

이용한, 예상욱, 흥진실  
한양대학교 해양융합과학과

이 연구에서는 지난 41년(1979년~2019년)동안 동아시아 극한 기온의 발생 빈도에 대해 조사하고 90년대 전·후반시기 극한 기온을 발생시키는 요인들이 어떻게 변화했는지 조사하였다. 각 지역별로 일 최고 기온과 최저 기온이 평년(1981년~2010년)동안의 90<sup>th</sup> 퍼센타일이 넘는 날 들을 동아시아 극한 기온 날 (Extreme Heat day, EHD)로 정의하였다. 동아시아 EHD의 발생 빈도수는 시간에 따라 증가하는 모습을 보였으며, 특히 1997년 전·후 시기를 경계로 뚜렷한 regime shift가 관측되었다. 1997년 전·후로 발생 빈도수가 평균 0.6회에서 1.6회로 증가하였다. 1997년 이전 기간을 P1 (1979년~1996년) 이후 기간을 P2 기간 (1997년~2019년)으로 나누어 두 기간의 차이를 비교해보았다. P1 기간과 비교하여 P2 기간의 EHD의 발생빈도는 시베리아 지역의 고온 현상 및 바렌츠 지역 해수면 온도 상승과 밀접한 관련성을 가지고 있었으며 열대 지역의 해수면 온도 구조도 서로 다름을 확인 할 수 있었다. 특히 EHD와 관련성을 가지고 있는 인도양과 서태평양 (50E~150E)의 해수면 온도, 상향 장파 복사량 및 강수량의 구조가 P1 기간과 P2 기간이 서로 상이함을 확인하였다. 이를 통해 1990년대 후반 이후 동아시아 지역의 EHD의 발생을 야기하는 역학적, 물리적 작용의 변화가 있음을 추측할 수 있었다. 나아가 동아시아 극한 기온을 예측하기 위한 예측 인자들은 일정하지 않으며 장주기 시간 규모에 따라 변할 수 있음을 파악할 수 있었다.

## 겨울철 북미 표층 기온에 영향을 미치는 북태평양 제트의 변동 특성 변화 연구

송세용<sup>1)</sup>, 예상욱<sup>1)</sup>, 조현수<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교, <sup>2)</sup>전남대학교

상층 대류권계면 부근에서 좁고 동서방향으로 강하게 부는 바람인 제트기류는 대기 원격상관 패턴을 통해 중위도 지역 날씨 및 기후와 밀접한 관련이 있다. 특히 북태평양 지역에 존재하는 제트기류는 강도 및 위도 변동성을 특징으로 하며 해수면 온도 변동성과 관련된 해양-대기 상호작용 과정을 통해 뚜렷한 장주기 변동 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 1990년대 후반을 경계로 한 겨울철 북태평양 해수면 온도의 장주기 변화와 이와 관련된 북태평양 제트의 변동 특성을 분석하였다. 최근 들어 겨울철 북태평양 제트의 강도 변동성은 줄어들고 있으나 위도 변동성은 증가하고 있는 것으로 나타났으며 이와 함께 북미 표층 기온은 제트의 위도 변동성과 밀접한 관련성을 보였다. 제트 변동 특성 변화에 대한 원인은 장주기 해수면 온도 변화에 따른 북태평양 제트의 북상인 것으로 사료되며 이상화된 대기모형 실험을 통해 이러한 가능성을 살펴보았다. 이 연구 결과는 북태평양 장주기 해수면 온도 변동성과 이와 관련된 제트 변동 특성 변화를 이해하는 것이 겨울철 북미 지역 날씨 및 기후를 예측하는데 있어서 중요하며 나아가 동아시아를 포함한 중위도 지역에 미치는 영향에 대해서도 연구가 필요함을 시사한다.

# 새로운 표준 기후 평년 시기 동아시아 겨울 기온과 태평양 십년주기 진동 간의 상관성 변화 연구

홍진실, 예상욱

한양대학교 해양융합과학과

동아시아 겨울철 기온 편차를 결정하는 겨울 몬순은 ENSO (El Niño–Southern Oscillation)나 PDO (Pacific Decadal Oscillation)와 같은 다양한 기후 변동성들의 영향을 받는다. 한편 최근 표준 기후 평년 기간이 1981년~2010년에서 1991년~2020년으로 변함에 따라 서로 다른 표준 평년 기간에서 기후 변동성들의 특성 차이에 대한 이해가 요구된다. 본 연구에서는 동아시아 겨울 기온과 태평양 장주기 변동성인 PDO 와의 상관관계의 변화에 대해 조사하였다. 분석을 위해 해양 표층 수온자료로 HadISST(Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature), 강수 자료로 GPCP(Global Precipitation Climatology Project), 대기장 자료는 NCEP–NCAR Reanalysis 1 자료를 사용하였다. 먼저 동아시아 겨울 기온과 PDO의 이동상관분석에서 두 변동성이 1980년대에는 음의 상관관계를 가지는 반면 최근 들어 양의 상관관계로 변화하는 것을 발견하였다. 두 표준 평년(1981년~2010년, 1991년~2019년)기간에서 PDO 위상에 따른 동아시아 지역의 기온 합성장의 차이를 통해 새로운 표준평년 기간(1991년~2019년)에서 양의 PDO일 때는 동아시아가 따뜻해지고, 음의 PDO일 때는 차가워졌다. 이는 새로운 표준평년 기간에서 PDO와 동아시아 겨울기온이 양의 상관관계를 가진다는 것을 보여준다. 한편 이러한 관계 변화의 원인으로서는 여러 선행연구에서 제시된 바와 같이 북대서양의 영향이 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서도 새로운 표준 평년 기간에 북대서양 지역 표층 수온과 강수가 증가하여 강제력으로 작용할 수 있음을 확인하였다.

# 겨울철 동아시아 몬순 특성에 대한 북서·북중 대서양 해양-대기 상호 작용의 중요성

마승주, 오새윤, 예상욱  
한양대학교 해양융합과학과

본 연구에서는 겨울철 북서·북중 대서양 해양-대기 상호 작용의 차이에 따른 동아시아 몬순 특성의 차이에 대해 조사하였다. 겨울철 북서·북중 대서양의 해수면 온도 강제력은 대기 원격 상관성을 통해 동아시아 겨울 몬순의 변동성과 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 관계가 북대서양에서 해양-대기 상호작용의 특성에 따라 어떻게 달라지는지에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 이와 같은 관련성을 이해하기 위해 북서·북중 대서양의 해수면 온도가 따뜻하면서 많은 강수량을 동반하는 사례-해양이 대기의 강제력으로 작용하는 사례-와 해수면 온도가 따뜻하면서 적은 강수량을 동반하는 사례-대기가 해양의 강제력으로 작용하는 사례-의 합성도를 분석하였다. 그 결과 동아시아 겨울 몬순에 대한 북서·북중 대서양 해수면 온도의 영향은 이 지역의 해양-대기 상호작용의 특성에 따라 달라짐을 확인할 수 있었다. 나아가 이러한 특성이 열대 태평양의 해수면 온도 조건에 크게 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해 북대서양 해수면 온도가 동아시아 겨울 몬순 변동성에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 이 지역에서 해양-대기 상호작용의 특성을 고려해야함을 알 수 있었다.

## 2020년 동아시아 여름 강수에 대한 열대 인자의 영향

김선용<sup>1)</sup>, 박재흥<sup>2)</sup>, 국종성<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 비가역적 기후변화 연구센터

<sup>2)</sup>포항공과대학교 환경공학부

2020년 여름, 한국, 중국, 일본을 포함한 동아시아의 국가들은 기록적인 강수를 경험하였다. 본 연구에서는 7월과 8월 동아시아의 강수가 어떤 역학으로 발생하는지 분석하였다. 6월 열대 인도양의 해수면온도 상승은 7월 동아시아에 동서방향으로 긴 형태의 강수대가 발달하는데 기여한다. 인도양 해수면온도의 상승은 북서태평양에 고기압을 유도하는데, 이 고기압은 동아시아로 온난습윤한 공기를 수송하는 역할을 한다. 반면, 8월 동아시아의 강수는 7월보다 북상하여 동아시아 전역에서 강수가 증가한다. 이는 8월에 아열대 북서태평양의 강수 감소가 북서태평양 고기압 형성에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 그러므로 2020년 7, 8월에 발생한 기록적인 동아시아의 강수는 열대 인도양의 해수면온도 상승, 아열대 북서태평양의 강수 감소와 같은 열대 인자들에 의해 설명할 수 있다.

## 북극해 온난화가

# 여름철 동아시아 폭염 발생에 미치는 영향 연구

김다슬, 국종성

포항공과대학교 환경공학부

지구온난화 하에서 북극 지역은 얼음 반사 되먹임(sea ice-albedo feedback), 온도 되먹임(temperature feedback) 등에 의해 북반구 평균보다 약 2배가량 빠르게 온난화가 진행되는 지역으로 알려져 있다. 최근 이러한 북극 지역의 온난화와 중위도 기후의 상관관계에 대한 연구들이 활발하게 이루어지고 있으나, 그 범위가 겨울철에 제한되어 있어 북극 온난화에 의한 여름철 기후 반응 대한 연구가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 북극에서 가장 큰 변동성을 가진 지역 중 하나인 바렌츠-카라해의 기온 상승 및 해빙 감소가 동아시아에 기후에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 월평균 자료를 통해 선행-지연 상관관계를 분석한 결과, 바렌츠-카라해 지역의 7월 기온 상승 및 해빙 농도 감소가 동아시아 지역의 8월 기온과 강한 양의 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 관련된 역학 과정을 이해하기 위해 바렌츠-카라해 지역의 7월 기온 및 해빙 농도와 대기 상층의 회귀계수를 계산하였다. 7월에는 따뜻한 지표 강제력과 온난 이류에 의해 바렌츠-카라해에 고기압성 순환이 존재한다. 이때 하류(down stream) 지역인 동아시아 및 베링해 지역에 순압(barotropic) 구조를 가진 고기압이 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 8월에 이 두 지역에 나타난 고기압이 강화되는 것을 확인할 수 있었다. 고기압성 흐름을 따라 하층에 유도된 온난 이류와 지표에 도달하는 단파 복사량 증가는 여름철 동아시아 기온 상승에 영향을 미칠 수 있다.

# CMIP6에서의 기후 변화에 따른 중앙 태평양 엘니뇨 발생의 증가에 대한 연구

국종성<sup>1)†</sup>, 신나연<sup>1)†</sup>, 김건일<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>포항공과대학교 환경공학부

†: 위 저자는 본 연구에 동일한 기여를 하였음.

ENSO (El Nino and Southern Oscillation) 는 공간적 패턴의 다양성이 존재하며, 이는 전 지구적으로 영향을 미치는 것으로 알려져 왔다. 그러므로, 엘니뇨의 다양성이 기후 변화 하에서 어떻게 변화할 것인가는 미래 기후 예측에 있어 가장 중요한 문제들 중 하나이다. 본 연구에서는, 새롭게 업데이트 된 기후 모델 시뮬레이션인 Coupled Model Intercomparison Project phases 6 (CMIP6) 을 기반으로 기후 변화 하에서의 엘니뇨 다양성에 대해 조사하였다. 엘니뇨의 공간적 분포 특성을 이해하기 위해, 관측에서 각 엘니뇨 피크의 경도 분포를 조사하였을 때, 쌍봉분포를 띄고 있는 것으로 분석되었다. 마찬가지로, CMIP6 앙상블 평균에 대해 살펴보았을 때, historical (1850-2014) 기간에서는 약한 쌍봉분포를 보였고, SSP 585 시나리오 (2051-2100) 로 가면서 더 뚜렷하게 분포하는 것으로 확인되었다. 흥미롭게도, 엘니뇨 종류의 다양성 관점에서 중앙 태평양 엘니뇨 발생의 증가와 동태평양 엘니뇨의 변동성 증가를 모의하는 모형이 지배적이었다. 이러한 변화는 해양 성층화의 강화로부터 비롯되었다. 뚜렷해진 해양 성층화로 인해 대기-해양의 상호작용은 더 강해지고, 이에 따라 주어진 바람에 대한 표층 해류의 반응이 세지면서 더 강한 표층 피드백을 갖게 된다. 또한, 표층 피드백이 강화됨에 따라 중앙 태평양 표층 수온 변동성의 기간을 단축하는 역할을 하며, 이는 더 빈번한 중앙 태평양 엘니뇨의 발생으로 이어진다.

## 미래 기후 북극해 식물성플랑크톤

노경민<sup>1)</sup>, 임형규<sup>2)</sup>, 국종성<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>포항공과대학교 환경공학부

<sup>2)</sup>Princeton University / Atmospheric and Oceanic Sciences Program

최근 북극지역은 북극 증폭으로 인해 지구온난화가 더 빠르게 진행이 되었고, 그것으로 인해 북극해에서는 해수면 온도의 증가, 해빙의 감소 및 성층화 강화와 같은 물리적 환경의 변화를 가져왔다. 이러한 북극해의 물리적 변화하에서 북극해의 일차생산량은 관측된 이래로 최근 20년 동안 계속 증가해왔었고, 특히 최근 10년 동안의 증가는 클로로필의 증가가 큰 역할을 하고 있음이 알려졌다 (Lewis et al., 2020). 그러나, 최신 지구시스템모형을 통한 미래 기후 북극해 클로로필 변화 예측은 여전히 매우 큰 불확실성을 갖고 있다. 본 연구에서는 Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) 5,6 자료들을 사용하여 미래 기후의 북극해 클로로필 변화에 대하여 조사하였다. 최근 CMIP6에서는 물리적 변수들에 대한 모델들의 성능은 향상되었지만 (Seferian et al., 2020), 클로로필 예측과 관련한 불확실성은 오히려 커졌다. 본 연구에서는 미래 영양분이 부족한 북극해 기후에서, 질산염의 배경농도가 미래 클로로필 예측의 모델간 다양성을 설명하는데 가장 중요한 요인이라는 것을 밝혀내었다. 관측 자료들을 모델간 질산염 배경장 과 미래 클로로필 변화의 선형적 관계에 적용을 해보면 미래 기후에서 클로로필이 약 -30에서 -40 퍼센트 정도 감소할 것으로 예측이 되어지고, 이 수치는 CMIP 모델들의 평균보다 약 2배에서 3배 정도 더 많이 감소하는 방향으로 추정이 되어진다. CMIP 모델과 질산염 관측자료를 통한 미래 클로로필 변화량의 예측은 미래 기후에서 북극해 일차 생산량을 더 정확하게 예측하는데 도움이 될 것으로 추정되어진다

# 이산화탄소 강제력에 대한 육상 탄소 순환의 가역성과 이력현상에 대한 평가

박소원, 국종성

포항공과대학교 환경공학부

지구온난화를 2도 이하로 제한하기 위해, 인류는 대기 중 축적된 이산화탄소를 줄여야하는 상황에 직면했다. 하지만, 대기 중 이산화탄소 농도를 조절하는 육상 생태계의 예측에는 여전히 큰 불확실성이 남아있으며, 특히 탄소 역배출에 도달 한 후의 육지 탄소 플럭스의 변화가 불명확하다. 그리하여 본 연구는 CMIP6 지구 시스템 모델의 이상적인 이산화탄소 증감 실험을 분석하여, 육상 탄소 순환의 가역성과 그 이력현상 뿐만 아니라 미래 기후에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 이산화탄소 강제력에 대한 육지 탄소 플럭스의 지연 반응으로 인해 대기 중 이산화탄소가 감소하기 시작하더라도 수십 년 동안은 총 토지 탄소 저장량이 계속 증가하였다. 이러한 육상 탄소 지연 반응의 시간 규모는 위도에 따라 다르게 나타나며, 고위도 지역에서 가역성의 시간 척도가 더 길게 나타났다. 특히, 이산화탄소 역배출 시기까지 고려한다면 북반구 침엽수림지대에서 다른 지역보다 장기간 동안 탄소를 저장될 수 있음을 발견하였다. 이러한 결과는 육상 탄소 순환의 지연에 의해 향후 역배출에 대한 부담이 감소될 수 있으며, 육지 탄소 흡수에 의한 일시적인 기후 변화 완화 가능성을 암시해준다. 또한, 이러한 육상 탄소 순환의 시공간적 특성은 조림 산업과 같은 자연 기후 솔루션의 효과적인 전략 수립을 위해 고려될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만, 현재 지구시스템 모형의 영구동토층 과정 모의 과정 배제 혹은 불확실성으로 인해 이산화탄소 강제력이 감소하더라도 영구동토층 지역에서 예기치 못한 비가역적 탄소 방출이 발생하여 추가적인 온난화를 초래할 수 있으므로 향후 정책 수립시 이에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

# 이산화탄소 제거 실험에서 북극 기후변화에 대한 AMOC 내부 변동성의 역할

오지훈, 국종성

포항공과대학교 환경공학부

많은 선행연구에서는 지구 시스템 모형에 의한 이산화탄소 가역성 실험을 통해 전 지구 평균 표면 온도는 거의 가역적이라고 주장했다. 하지만, 이산화탄소가 감소하는 기간에 북극 표면 온도의 앙상블 간 불확실성이 빠르게 증가하는 것으로 나타났다. 불확실성이 최대인 시점에 북극 온도를 다른 앙상블보다 높게 모의하는 앙상블은 최대인 시점보다 약 90년 전부터 북대서양 아극지역에서 표층 대기 온도가 더 높고, 해양 상층부의 염도가 높아지면서 성층이 약화된 특징을 보였다. 이러한 염도 반응은 대기의 반응을 선행하여 불확실성 최대 시점보다 약 140년 전부터 유의미하게 나타났다. 앙상블 간의 염도 차이는 이산화탄소 감소 기간에 AMOC와 관련된 염분이류 피드백에 의해 계속해서 증가한다. 그로 인한 해양 안정도의 감소는 이산화탄소 감소 기간동안 강화된 연직 온도경도에 의해 해양 상층부에서 더 높은 온도와 심층부에서 더 낮은 온도를 유도한다. 이 반응은 이산화탄소 감소 기간동안 AMOC-염분이류 피드백을 통해 계속해서 강화되어 이산화탄소가 더 이상 감소하지 않는 시점에 북극 표층 온도의 불확실성을 만들어낸다.

## 기후모형에서 ENSO의 장주기 변동을 조절하는 요인

김건일, 국종성

포항공과대학교 환경공학부

두 개의 전지구 기후모형의 장기적분 자료를 이용하여 ENSO의 장주기 변동을 제어하는 물리적인 과정을 분석하였다. 본 연구에서는 역학적인 피드백의 변화를 살펴보기 위하여 Bjerknes stability (BJ) 지수를 사용하였다. BJ 지수는 ENSO와 관련된 피드백을 선형적인 통계방식을 이용하여 정량화하는 지수로서, ENSO의 시계열 변화와 상관관계가 높게 나타났으며, 이는 BJ 지수가 ENSO의 장주기 변동을 잘 설명할 수 있음을 의미한다. 각 피드백의 변동성을 분석한 경로가 ENSO의 장주기 변동은 조절하는 가장 큰 요인은 수온약층 피드백인 것으로 나타났다. 여기서 수온약층 피드백은 총 두가지 요인에 의해 조절되는데, ENSO의 남북방향의 모양과 해양의 성층화이다. 극 지역으로 수송되는 해양순환이 약해지게 되면 ENSO와 관련된 대기 및 해양의 반응은 적도를 중심으로 좁게 형성된다. 따라서 해양 켈빈파가 증가하여 ENSO의 세기가 강해진다.. 또한 성층화된 해양은 연직 해양 경압불안정성을 조절하여 ENSO 시스템을 보다 효율적으로 만들어 ENSO의 크기를 증가 시키는 것으로 나타났다.

## CREDYT: 현업 주평균 예측 통합 평가프레임

이윤영, 김가영  
APEC기후센터

기상청은 GloSea5 모형을 활용하여 매주 1개월 예보 서비스를 운영하고 있고, 이에 대한 실시간 필수 메트릭 검증과 함께 주요 모형 이슈에 대한 평가 및 진단도 연구 과제를 통해 깊이 있게 이루어지고 있다. 하지만, 한 해 동안 예보의 질이 어땠는지, 다른 기관 대비 얼마나 우수한지, 작년에 비해서 성능 개선이 이루어졌는지 등의 상대적 검증, 총체적, 정기적인 정보 수집은 이루어지지 못하고 있다. 본 연구는 기상청 계절내 예측시스템 (KMA-GloSea5) 현업 주평균 예측을 연례적으로 평가하는 통합프레임을 개발 함으로써 현업 예보에 대하여 객관적이면서도 일관되며 여러 측면을 검토하되 그것들을 종합적으로 아우를 수 있는 평가 시스템의 기틀 마련을 목표로 하였다. 이를 위해 예보 평가에 필수인 기후값, 실시간 예측력, 기후 리짐, 역학적 커플링 네 부문에 대한 평가 컨텐츠 발굴하고, 이를 구조화하여 평가 프레임(CREDYT: Comprehensive and Relative Evaluating weekly mean DYnamical forecast)을 정립하였다. 또한, 실시간 예측 검증 및 모형 성능 진단에 대한 새로운 방법론(순위 기반 검증 지수 합산 평가 기법(RVMM), 지구시스템 간 연계성 진단법, 초기 기후 모드 상태에 대한 예측성 의존도 진단법 등)을 고안함으로써 예보의 역학적 측면에 대한 좀 더 깊이 있는 평가 정보 생산에 기여하고자 하였다. CREDYT 프레임 적용을 통해 매년 축적된 예보 평가 정보를 바탕으로 세계유수 기관 대비 KMA 현업 예측의 상대적 비교 우위를 판단하고, 향후 예보 개선을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

※ 사사: 이 연구는 APCC 연구로 수행되었습니다.

# 선제적 대응을 통한 APCC 다중모델 앙상블(MME)의 계절예측 정확도 향상

임창묵, 양유빈, 정다은  
APEC기후센터

APCC는 11개국 15개 유수 현업기관의 협조를 바탕으로 다양한 모델들을 구성하여 결정론적 및 확률론적 다중모델앙상블(Multi Model Ensemble, MME) 기법을 통해 3~6개월 기간의 고품질 계절예측 정보를 제공하고 있으며, 계절예측 정보의 신뢰도와 정확도를 보다 향상시키기 위하여 내부적/대외적인 선제적 대응을 통한 많은 노력을 기울이고 있다. 본 연구에서는 APCC MME 계절예측 정보의 예측 수준을 진단하고 평가하여 정확도 향상을 위한 방안들을 제시하고, 이러한 노력을 통한 정확도 향상 수준과 기여 정도를 함께 제시하고자 한다. APCC MME 계절예측 정보는 기후 평년값에 대한 편차 정보에 기반으로 두고 있으며, 다양한 기후 예측 모델 특성상 모델들의 공통 과거 기후 재현(hindcast) 기간을 선정하여 기후 평년값으로 사용해왔으나, 이러한 방식을 계속해서 고수하게 될 경우 최근 개선 및 개발되는 모델과 기존 모델간 과거 기후 재현기간의 불일치로 MME에 참여하지 못하는 모델이 대폭 증가하여 부정적인 영향이 예견되어왔다. 이에 기후 평년값 정의 방식을 개편하기 위하여 기후 평년 기간에 따른 통계적 유의성 검증과 예측력 민감도 분석을 수행하였으며, 분석 결과를 바탕으로 1991-2010년의 새로운 기후 평년 기간에 대한 기후 평년값을 사용함으로써 최근 개선 및 개발되는 모델들이 다수 참여할 수 있게 됨에 따라 2019년 대비 전구 기온 약 4.65% 전구 강수 약 4.26% 예측 정확도가 향상되었다. 또한, MME 참여 모델 후처리를 통하여 예측 정확도의 저하를 방지하고자 하였다. CMCC\_SPS3는 다른 모델에 비해 남반구 고위도 지역에서 상당히 낮은 예측 정확도로 인해 MME에 참여하지 못하였으나, 문제가 발생하는 지역에 대한 후처리를 통하여 일정 계절(여름철)에 대해 10% 이상의 예측력(ACC)이 높아지면서 MME 참여 모델의 확대와 예측 정확도 향상에 기여할 수 있었다. 이 외에도 MME 참여 모델들의 개선 및 개발에 대한 상시적인 대응과 후속조치를 통하여 보다 고품질의 예측정보를 MME에 참여시킴으로써 지속적으로 예측력 향상을 도모하고 있으며, 대외적인 노력뿐만 아니라 APCC 내부적인 자체 노력을 통하여 2020년 APCC MME 계절예측 정보의 예측 정확도와 신뢰도 향상에 주요하게 기여하고 있다. APCC는 보다 고품질의 예측 정보를 제공하기 위하여 위와 같은 노력을 꾸준히 수행하고자 하며, MME 계절예측 정보의 국가 및 기관간 경쟁력을 강화하고 활용 가능성을 높이기 위하여 사용자들의 요구사항을 적극 반영하여 보다 고해상도의 예측 자료를 보다 조기에 제공하는 등의 노력을 기울이고자 한다.

※ 사사: 이 연구는 APCC 연구로 수행되었습니다.

# 기계학습모델을 활용한 이상기후 확률전망 생산 기법 개발

이진영

APEC기후센터

이 연구에서는 보다 정교한 혹서기 이상기후 대응을 위해 기계학습모델을 활용하여 최고·최저·평균기온의 3개월 확률전망 생산 기법을 개발하였다. 관측자료 기반의 다양한 예측인자를 가우시안 프로세스 모델에 적용하여 전국 뿐 아니라 10개 지역별로 이상기후 확률전망정보를 생산하였는데, 기존에 평균기온 전망을 위해 활용하던 예측인자를 확장하여 3개월 최고·최저·평균기온 예측성을 향상시켰다. 여름의 초입인 6월과 더위가 한창일 7월과 8월의 최고·최저·평균기온을 여름이 오기 전인 5월 초중반에 예측하고자 관측자료 기반의 다양한 예측인자를 가우시안 프로세스 기계학습모델에 적용하였다. 예측인자로는 전년도 12월부터 금년도 4월까지의 장파복사, 해수면온도, 강수, 눈덮임, 850hPa 및 500hPa 지위고도와 해빙, 그리고 NOAA에서 제공하는 여러 대기해양 인자도 함께 활용하였다. 예측인자의 다양한 구성을 고려하여 여러 모델을 만들었으며 베이지안 모델 평균을 이용하여 이 결과들을 통합하여 결합모델(BMA) 결과를 생산하였다. 확률예보는 삼분위 다이어그램과 HSV(Hue-Saturation-Value) 색상모델을 이용하여(Jupp et al. 2012) 지역별 삼분위 확률전망정보를 시각적으로 전달하는 표현방안을 제시하여 예보관의 장기예보 및 사용자의 계절전망에 대한 활용성을 증대시키고자 하였다.

※ 사사: 이 연구는 APCC 연구로 수행되었습니다.

## The ESPreSSO<sup>v3</sup> (Expert Seasonal Prediction System for operational Seasonal Outlook)

김원무, 여새림  
APEC기후센터

최근 수 십 년간 수 개월 후의 기후 특성을 예측하는 계절 예측 기술이 꾸준히 발전하여, 다양한 분야의 의사 결정 과정에 필수적인 기후 예측 정보를 높은 신뢰도로 제공할 수 있게 되었다. 1970년대 통계적인 접근을 통하여 계절 예측의 가능성이 인식된 이래, 기후 물리/역학 과정에 대한 이해 증진과 함께 통계/역학 적인 다양한 예측 기술이 개발되었다. 에이펙기후센터는 선도적인 기후 정보 서비스 기관으로서 다중모델앙상블을 기반으로 고품질 계절 예측 정보를 제공하고 있다. 그러나, 현재 연구/운영 기관들에서 생산되고있는 예측 정보를 현업에 직접 활용하기 위해서는 편차 보정, 관측 결과 반영, 결과 해석 등 여전히 많은 후처리 과정이 필요하다.

이러한 기후 예측 정보 후처리 과정의 표준적인 절차를 바탕으로 맞춤형 다중모델앙상블 후처리 시스템인 ESPreSSO (Expert Seasonal Prediction System for Seasonal Outlook; Kor. Patent No. 10-1901311, 2017)가 개발된 바 있다. 이는 전문가의 지식과 경험을 토대로 다중모델앙상블 결과를 우리나라 기후 실정에 맞게 변환해주고 예측 결과의 해석에 도움을 주는 통계-역학 하이브리드 계절예측 시스템이다. 초기 버전은 전문가가 수동으로 제안한 보정 사상(mapping)을 객관적 선별을 통해 적용하는 방식으로 Heidke Skill Score 0-10% 수준의 예측 성능을 30-50% 까지 끌어올린 바 있다. 그러나 이러한 전문가의 직접 개입 방식은 변화하는 다중모델 환경에 빠르게 대처하기 어려운 측면이 있었다.

새로 개발된 ESPreSSOv3 는 예측 인자 선택 과정을 자동화하여 환경 변화에 민첩하게 대처하고, 예측 과정에 대한 설명과 모식도를 제공함으로써 예보 활용도를 높이고자 하였다. 새 시스템은 잠재 예측 변수와 지역에 대한 전문가의 개략적인 가이드를 바탕으로 다중모델앙상블의 예측 성능, 대륙-해양의 차이, 위도 의존성, 그리고 영향 반경 등을 고려하여 실제 기후에 맞는 베이스 보정 사상을 자동으로 생성한다. 한편, 새 시스템은 접근성 향상에도 공을 들여, 일반적인 확률 예측 결과 뿐만 아니라, 권역별 예보, 과거 검증 및 예측 성능, 그리고 기후 인자의 예측 상황과 이에 대한 우리나라 기후 반응에 대한 개념 모식도를 제공한다. 또한 계절 전망, 예측 인자 정보, 예측 상황 개요에 대한 자연어 요약을 제공하여 ESPreSSOv3 가 어떠한 근거로 계절 예측 전망을 생산하였는지 쉽게 이해할 수 있도록 하였다.

ESPreSSOv3 에 탑재된 몇가지 기능은 여전히 개발 단계이지만, 지난 2020-2021 년 운용 결과 상당한 수준(HSS 10-30%)의 예측 성능을 보여주고 있다. 특히, 새로운 다중모델앙상블 환경에 맞춘 전문가 가이드가 갱신되는 올해 하반기 이후, ESPreSSOv3 의 예측 성능은 추가적으로 향상될 것으로 보인다.

## 기후센터의 ESGF 데이터 노드를 활용한 CORDEX동아시아 자료 서비스

한정민, 최재원  
APEC기후센터

지역 모델을 적용한 기후변화 시나리오 자료의 해상도가 증가됨에 따라 대용량 기후자료를 공동으로 관리하고 운영하기 위한 ESGF (Earth System Grid Federation)가 주요 기관을 중심으로 구축되었다. ESGF는 Peer to Peer(P2P) 컴퓨팅 기술을 이용하여 모델의 출력, 관측 자료 관리·보급 및 분석을 제공하기 위한 표준 소프트웨어를 개발하고 각 역할에 따라 인덱스 노드와 데이터 노드로 구분하였다. 인덱스 노드는 사용자들에서 서비스를 담당하는 역할을 수행하고 있고, 데이터 노드는 각 지역에서 생산된 자료를 배포하는 역할을 수행한다. 그리하여, 동아시아 지역의 기후변화 연구를 위해 국립기상과학원, 울산과학기술원, 포항공과대학교, 부산대학교, 공주대학교에서 생산하고 있는 CORDEX 동아시아 지역기후변화 시나리오 자료를 전 세계에 공유하기 위해 APEC기후센터에 ESGF데이터 노드를 구축하였다. APEC기후센터의 데이터 노드는 ESGF로의 요구조건을 충족하여 2019년 정식노드로 인증을 받아 스웨덴의 인덱스 노드와 연동을 완료하였다. 국내에서 생산된 CORDEX 고해상도 동아시아 지역기후모델 자료(데이터셋: 291건, 파일: 5,238건)를 ESGF데이터 노드를 통해 배포되었으며 CORDEX자료를 전 세계에 제공하는 중요한 역할을 수행하고 있다.

※ 사사: 이 연구는 APCC 연구로 수행되었습니다.

# 사용자 맞춤형 계절예측 자료 추출 및 가공 웹 서비스

한정민, 임창묵

APEC기후센터

APEC기후센터는 여러 기관에서 독자적인 개별모델로 생산된 예측자료를 이용하여 다중모델앙상블 기법을 적용한 계절예측자료를 생산하고 제공하는 역할을 수행한다. 다중모델앙상블 계절예측자료는 결정론적 다중 모델 예측과 확률론적 예측 기법을 이용하여 기후평년값에 대한 편차를 제공하며 전 지구 영역의 정해진 hindcast기간을 이용하여 계절평균과 월별평균 정보를 제공한다. 이렇게 생산된 계절예측자료는 아시아 태평양 지역의 많은 국가들에게 제공하고 있으며 각 나라들의 자신의 환경에 맞도록 활용하고 있지만, APEC기후센터에서 제공하는 자료는 공간정보와 시간정보가 함께 존재하는 파일포맷으로 이루어져 있어, 일반 연구자들이 이해하기 어려울 뿐만 아니라, 이를 가공하거나 분석하기 위해서는 고성능 네트워크·컴퓨터 자원이 필요하다. 전산자원이 부족한 아시아 태평양 지역의 여러 국가들을 위하여 APEC기후센터의 컴퓨팅 계산 자원을 활용하여 사용자가 필요로 하는 변수, 지역에 대해 사용자가 원하는 정보를 추출하고 개별모델을 이용하여 사용자가 기간을 직접 선택하여 예측자료의 평균, 편차를 계산하는 등 사용자가 원하는 정보를 추출하고 가공하여 다양한 파일포맷으로 제공할 수 있는 사용자 맞춤형 웹 서비스를 개발하였다. 이 연구에서 사용자는 계절예측자료를 사용함에 있어 전산자원의 제약을 극복할 수 있을 뿐만 아니라, 자신이 원하는 형태로 자유롭게 자료를 가공하여 제공함으로써 사용자 편리성을 증대하였다.

※ 사사: 이 연구는 APCC 연구로 수행되었습니다.

## 클라우드 기반 계절예측 및 관측자료 합성 서비스

한정민, 임창묵

APEC기후센터

APEC기후센터는 11개국 15개 기후 예측 현업 및 연구기관으로부터 기후예측모델(이하 개별 모델)의 계절예측자료를 제공받아 다중모델 앙상블(Multi-Model Ensemble, MME) 기법을 적용한 고품질계절예측 자료를 생산하고 있다. 참여하는 개별 모델 간의 불확실성을 최소화하기 위해 다중모델 앙상블 기법을 이용하여 개별 모델이 갖는 예측성 보다 안정적이고, 향상된 예측성으로써 제공하고 있다. 특정 기후 현상에 대해 보다 정확히 이해하기 위해서는 유사하게 나타난 기후 현상들의 특성 및 양상을 우선 파악해야 하며, 그 방법으로 유사한 현상들이 나타난 사례들을 시간에 따라 종합한 합성(Composite)방법을 활용하여 기후학적 특성을 파악하고 원인을 분석하는 등에 주로 이용된다. 이 연구에서는 사용자가 원하는 변수 및 시간 정보에 대한 다양한 합성 기능을 제공하기 위하여 APEC기후센터에서 제공하는 기후 예측자료 및 관측자료의 합성을 직관적이고 손쉽게 수행할 수 있는 서비스를 개발하였다. 또한, 사용자가 관심 있는 기후평년 기간을 사용자가 자유롭게 선정하여 원하는 편차 정보(Anomaly)를 산출할 수 있을 뿐만 아니라, 예측 정보와 관측 정보를 동시에 상호 비교할 수 있는 서비스를 구축하여 사용자 편의성을 제공하고자 하였다.

※ 사사: 이 연구는 APCC 연구로 수행되었습니다.



