

GPS RO 관측자료 동화의 북극 지역 날씨  
예측에의 영향 연구

Effects of GPS RO data assimilation on Arctic weather  
predictability



2021. 02. 17.

한 국 해 양 과 학 기 술 원  
부 설 극 지 연 구 소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “GPS RO 관측자료 동화의 북극 지역 날씨 예측에의 영향 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2021. 2.



보고서 초록

과제관리번호	PE20390	해당단계 연구기간	2020.05.01. ~ 2020.12.31.	단계 구분	1 / 1	
연구사업명	중 사업 명	연구·정책지원사업				
	세부사업명	신진연구원지원과제				
연구과제명	중 과 제 명					
	세부(단위)과제명	GPS RO 관측자료 동화의 북극 지역 날씨 예측에의 영향 연구				
연구책임자	최용한	해당단계 참여연구원수	총 : 1 명 내부 : 1 명 외부 : 1 명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 1 천원 계: 30,000 천원	
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소/대기연구본부		참여기업명			
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :				
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :				
요약					보고서 면수	65
<p>○ 연구목적 및 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 지역규모 대기모형과 3차원 변분 자료동화 방법을 이용하여, GPS RO 관측자료 동화의 북극 지역 날씨 예측에의 영향 분석</li> <li>- 북극 지역은 중위도 지역에 비해, 종관 관측자료의 수가 적고, 극궤도위성으로부터 획득할 수 있는 복사휘도 관측자료는 기상조건이나 표면조건에 의해 자료동화에의 활용이 제한됨</li> <li>- GPS/GNSS RO 관측자료는 기상조건이나 표면조건에 관계없이 동화에 활용할 수 있고, 연직방향 해상도 및 정확도가 높으며 별도의 보정과정을 거치지 않아도 되는 장점이 있음</li> <li>- 최근 일부 기상회사에서 운영 중인 큐브위성으로부터 획득한 GPS/GNSS RO 관측자료의 수가 증가하면서, 이러한 관측자료의 활용에 대한 관심이 높아지고 있음</li> </ul> <p>○ 연구내용 및 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 지역규모 대기모형과 3차원 변분 자료동화 방법을 이용한 GPS RO 관측자료 동화 및 예측 실험 수행</li> <li>- 수반모형 기반 관측민감도 실험 수행</li> <li>- GPS RO 관측자료 동화의 북극 지역 날씨 예측에의 영향 정량화</li> </ul> <p>○ 연구개발 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 지역규모 대기모형 WRF 모형과 자료동화시스템 WRFDA 시스템을 설치하여, 관측 시스템 실험 수행</li> <li>- 대기 재분석자료, 자체 분석장, 아라운호 관측자료 (라디오존데, AWS)를 이용하여, 예측결과를 검증</li> <li>- 검증 결과, GPS RO 관측자료의 동화가 대류권 상부 및 성층권 하부의 온도 편차를 줄여주나, WRF 모형의 계통적 오차 (표면 근처 온도 편차)에 의해 온도 개선 효과가 제한되는 것을 확인</li> <li>- 수반모형 기반 관측민감도 실험을 수행</li> <li>- GPS RO 관측자료의 관측효과는 적외선센서 다음으로 큰 것으로 나타났는데, 이는 북극 지역 관측 부족과 WRFDA 시스템 내 마이크로파센서 동화의 한계에 기인한 것으로 추정됨</li> </ul> <p>○ 연구개발결과의 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기구측된 KPOPS-Weather 시스템에 적용하여, 북극 지역 및 남극 지역의 날씨 예측성 향상을 위한 기초연구로 활용</li> <li>- 대기-지면-해양-해빙 결합 지구시스템 모델에 적용하여, 대기 초기조건의 개선하고, 한반도를 포함한 중위도 지역의 계절 예측 향상을 위한 기초연구로 활용</li> </ul>						
색인어 (각 5개 이상)	한 글	수치모델링, 자료동화, GPS/GNSS RO 자료, 관측민감도, 관측시스템실험				
	영 어	Numerical modeling, Data assimilation, GPS/GNSS RO data, Forecast Sensitivity to Observation (FSO), Observation System Experiment (OSE)				

# 요 약 문

## I. 제 목

GPS RO 관측자료 동화의 북극 지역 날씨 예측에의 영향 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 북극 지역은 중위도 지역과 달리 종관 관측자료 (예, 라디오존데, 지상관측소, 선박, 부이 등)의 양이 적고, 극궤도위성으로부터 획득할 수 있는 복사휘도자료는, 구름이나 강수현상 유무 (적외센서), 그리고 눈이나 해빙 등 표면조건 (마이크로파센서)에 의해 자료동화에서의 활용이 제한됨
- GPS/GNSS RO 관측자료는, 기상조건이나 표면조건에 관계없이 사용할 수 있고, 연직방향의 해상도와 정확도가 높으며 편차보정 없이 바로 사용할 수 있는 장점이 있음
- 최근 미국 기상회사를 중심으로, 큐브위성에 GPS 위성으로부터 송신되는 라디오파를 수신할 수 있는 수신기를 탑재하여 획득한 GPS/GNSS RO 관측자료의 양이 증가하고 있음
- 지구온난화로 인해, 북극 지역 해빙이 감소하고 이에 따라 북극항로에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데, 북극 지역 날씨 예측의 예측서를 높이는 것은 큰 의의를 가짐
- 지역규모 대기 모형과 3차원 변분 자료동화 방법을 이용하여, GPS RO 관측자료의 동화가 북극 지역 날씨 예측에 미치는 영향을 정량화하여, 북극 지역 날씨 예측성을 향상시키기 위한 기초 연구로 활용하는 것을 목적으로 함

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 지역규모 대기모형과 3차원 변분 자료동화 방법을 이용한 GPS RO 관측자료 동화 및 예측 실험 수행
- 수반모형을 기반으로 하는 관측민감도 실험 수행
- GPS RO 관측자료 동화가 북극 지역 분석장 및 예보장에 미치는 영향 분석

## IV. 연구개발결과

- 지역규모 대기모형인 WRF 모형을 연구소 계산서버에 설치하고, 선행연구결과를 참조하여 모형 수행을 위한 모의영역, 초기 및 경계조건, 그리고 물리과정조합을 선정함
- WRFDA 자료동화시스템을 연구소 계산서버에 설치한 후, 배경오차공분산 계산, 분석-예보

- 사이클링 실험을 위한 스크립트 작성, 관측자료의 전처리 등을 수행함
- WRF 모형과 WRFDA 시스템을 이용하여, GPS RO 관측자료의 동화효과를 파악하기 위한 관측 시스템 실험 (OSE)을 수행하고 그 결과를 분석함
  - 재분석자료인 ECMWF ERA5, NCEP FNL 자료 외에, 자체 분석장, 아라온호에서 획득한 라디오존데, AWS 관측자료를 이용하여 예측결과에 대한 검증을 수행함
  - 서로 다른 기준값을 이용한 검증결과는 정성적으로 서로 일관되며, GPS RO 관측자료의 동화를 통해, 대류권 상부/성층권 하부의 음의 온도 편차가 줄어드는 것을 확인하였고, 상대적으로 수증기 변수에 대한 영향은 작음을 확인함
  - WRF 모형의 지표면 근처에서의 음의 온도 편차로 인해, 저기압이 발달하는 경우, 대기 상층에서의 온도 변수 개선이 다른 변수의 개선으로 이어지거나, 오래 지속되지 못하는 것을 확인함
  - WRF 모형에 대한 수반모형을 연구소 계산서버에 설치하고, 수반모형 기반 관측민감도 실험을 수행함
  - 관측민감도 실험 결과를 분석해 보면, 선행연구결과에 비해, 북극 지역 날씨 예측 오차 감소에 GPS RO 관측자료의 기여도가 크게 나타나며, 이는 WRFDA 시스템에서 마이크로파 센서 관측자료의 동화가 현업기관 자료동화시스템에 비해 제한되기 때문인 것으로 보임

#### V. 연구개발결과의 활용계획

- 연구개발결과를 기구축된 KPOPS-Weather에 적용하여, 북극 지역 날씨 예측의 예측성을 높이는 데 사용
- 대기-해양-해빙 결합 지구시스템 모델에 적용하여, 대기 초기조건 개선 (특히, 성층권 하부)을 통해 한반도를 포함한 중위도 지역 계절 예측의 예측성을 향상시키기 위한 기초연구로 활용
- 북극 외에 남극 날씨 예측에도 적용하여, 연구소 극지 활동 시 참고자료로 활용할 수 있는 예측결과 제공을 위한, 극지예측시스템의 고도화

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
제 1 절 연구개발의 목적 .....	1
제 2 절 연구개발의 필요성 .....	1
제 3 절 연구개발의 내용 및 범위 .....	3
제 2 장 국내외 연구개발 현황 .....	4
제 1 절 국외 연구동향 .....	4
제 2 절 국내 연구동향 .....	12
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 .....	14
제 1 절 대기모형과 변분 자료동화 방법을 이용한 GPS RO 관측자료 동화 및 예측 실험 수행 .....	14
제 2 절 수반모형 기반의 관측민감도 실험 수행 .....	18
제 3 절 GPS RO 관측자료의 동화가 북극 지역 날씨 예측에 미치는 영향 분석 .....	19
제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외기여도 .....	61
제 1 절 목표달성도 .....	61
제 2 절 대외기여도 .....	62
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	63
제 6 장 참고문헌 .....	64

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구개발의 목적

지역규모 대기모형과 3차원 변분 자료동화 방법을 이용한 GPS (Global Positioning System) RO (Radio Occultation) 관측자료 동화의 북극 지역 날씨 예측에의 영향 분석

## 제 2 절 연구개발의 필요성

### 1. 기술적 필요성

가. 라디오존데 (radiosonde), 윈드 프로파일러 (wind profiler), 부이 (buoy), 선박 (ship), 지상 (land) 관측 등 전통적인 종관 관측자료 (conventional observation)는 북반구 중위도 지역에 집중되어 있고, 북극 지역의 경우 사용할 수 있는 관측자료의 양이 제한적임

나. 극궤도 위성 (polar-orbiting satellite)에 탑재된 적외 (infrared) 혹은 마이크로파 (microwave) 센서의 복사휘도 (radiance) 관측은 대기의 온도와 습도에 대한 정보를 제공할 수 있고, 극 지역을 주기적으로 통과한다는 장점이 있으나, 구름, 강수, 그리고 표면조건 (예, 해빙, 눈)에 따라 사용이 제한되는 한계가 있음

다. GNSS/GPS (Global Navigation Satellite System/GPS) RO 자료는 기존의 GNSS/GPS 위성에서 발신하는 라디오파를 LEO (Low Earth Orbiting) 위성에서 수신하는 과정에서 대기 (대기의 온도, 습도, 전자밀도 등)에 의해 라디오파가 굴절 (refraction)되는 현상을 이용함

라. GPS RO 자료는 대기의 온도, 습도, 그리고 압력에 대한 정보를 제공하며 연직 방향의 해상도가 높고, 위성 복사휘도 관측자료와 달리, 구름이나 강수의 유무, 표면의 특성에 관계 없이 사용할 수 있다는 장점이 있음

마. GPS RO 자료는 위성 복사휘도 자료와 달리, 별도의 편차보정 (bias correction) 과정을 거치지 않아도 되고 정확도가 상당히 높은 것으로 알려져 있음

### 2. 경제·산업적 필요성

가. 지구온난화로 인한 북극 해빙의 감소로, 북극 항로 (Northern Sea Route)에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데, GPS RO 관측자료의 동화가 북극 지역 날씨 예측에 미치는 영향을

정량화함으로써, 북극 항로 이용에 있어 중요한 날씨 예측의 예측성을 높이는 데 기여할 수 있음

나. GPS RO 관측자료의 동화가 남극 지역 날씨 예측에 미치는 영향을 평가하는 연구로의 확장이 가능하며, 북극 및 남극 지역의 날씨 예측성 향상은 연구소의 극지역 연구활동의 안전 확보에 기여할 수 있음

### 3. 과학적 필요성

가. 수치모형을 이용한 날씨 예측의 예측성은 초기조건의 불확실성 (uncertainty), 수치모형 역학 및 물리과정의 불완전성 (incompleteness), 그리고 대기현상의 비선형성 (nonlinearity)에 의해 제한됨

나. 수치모형 초기조건의 불확실성을 줄이기 위하여, 자료동화 (data assimilation)라는 방법을 사용하는데, 자료동화는 통계적으로 최적화된 관점에서 배경장 (background), 관측 (observation), 그리고 각각의 오차 (background & observation error covariance)를 이용하여 대기의 상태를 추정하는 기법임

다. 자료동화 방법은 크게 변분 (variational) 자료동화 방법, 앙상블 기반 (ensemble-based) 자료동화 방법, 그리고 하이브리드 (hybrid) 자료동화 방법으로 나눌 수 있는데, 현업기관의 예측시스템에서는 관측자료를 보다 효과적으로 이용하기 위하여 가장 고도화된 자료동화 방법인 하이브리드 자료동화 방법을 사용하고 있음

라. 초기조건의 불확실성을 줄이기 위해서는 자료동화 방법의 개발 외에도, 새로운 관측 플랫폼을 추가하거나 기존의 관측자료를 보다 효율적으로 이용하기 위한 노력이 필요한데, GPS RO 관측자료는 비교적 적은 노력으로 대기의 온도와 습도에 대한 정확한 정보를 제공할 수 있는 장점이 있음

마. 자료동화-예측 시스템에서 관측종의 예측성 향상에 대한 기여를 정량화하는 것은 관측자료를 보다 효율적으로 사용하기 위한 시스템 개선과 새로운 관측 플랫폼 추가 계획을 수립하는 데 있어 의의가 있음

### 4. 사회·문화적 필요성

가. GPS RO 관측자료의 동화가 지역규모 모형의 날씨 예측성에 미치는 영향을 정량화하는 연구는, 전구모형으로 확장되어 전구모형을 이용한 날씨 예측의 예측성 향상에 기여할 수 있음

고, 한반도에서 발생하는 한파, 폭염, 미세먼지 현상에 북극의 대기가 중요한 역할을 한다는 선행연구 결과를 고려했을 때, 한반도 극한 기상 예측에도 도움을 줄 수 있음

나. GPS RO 관측자료의 동화는 기본적으로 대기 현상의 예측성 향상에 기여하지만, 해빙모형에 사용되는 대기 강제력 (atmospheric forcing)의 정확도를 높임으로써 해빙 예측의 예측성 향상에도 도움을 줄 수 있고 이는 북극 항로 이용시 선박 운항에 활용될 수 있음

### 제 3 절 연구개발의 내용 및 범위

1. 지역규모 대기모형과 3차원 변분 자료동화 방법을 이용한 GPS RO 관측자료의 동화 및 예측 실험 수행

가. GPS RO 관측자료를 동화하지 않은 실험 (Observation System Experiment)을 수행하여, GPS RO 관측자료 동화의 날씨 예측에의 영향 분석

나. 큐브위성 (cube satellite)으로부터 획득한 GPS RO 관측자료를 추가로 동화하여, 추가 관측자료의 동화 효과를 분석

2. 수반모형을 기반으로 하는 관측민감도 실험 수행

가. 수반모형 기반 관측민감도 (Forecast Sensitivity to Observation) 실험 수행을 위한 사전조사 실시

나. 수반모형 기반 관측민감도 결과 분석을 통해 특정 관측종의 예측성 향상에의 영향 정량화

3. GPS RO 관측자료의 동화가 북극 지역 분석장 및 예보장에 미치는 영향 분석

가. 동화 실험에 사용되지 않은 관측자료, 재분석자료 등을 이용하여, GPS RO 관측자료의 동화가 북극 지역 날씨 예측에 미치는 영향 분석 (OSE, FSO 실험결과 분석)

## 제 2 장 국내외 연구개발 현황

### 제 1 절 국외 연구동향

미국 기상청 (National Centers for Environmental Prediction; NCEP)에서는 현업 예보에서 사용하는 전구 대기 모형, GFS (Global Forecast System)와 자료동화체계, GDAS-GSI (Global Data Assimilation System-Gridpoint Statistical Interpolation) 내 3차원 변분 자료동화 방법을 이용하여, COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) 위성으로부터 획득한 GPS RO 관측자료의 동화 효과를 분석함. 동화가능한 2개의 변수 (refractivity, bending angle) 가운데, 굴절률 변수를 선택함. 북반구보다는 적도와 남반구에서, 온도, 습도, 그리고 지위고도의 예측성이 향상되는 것을 확인함 (Cucurull and Derber, 2008; 그림 1).



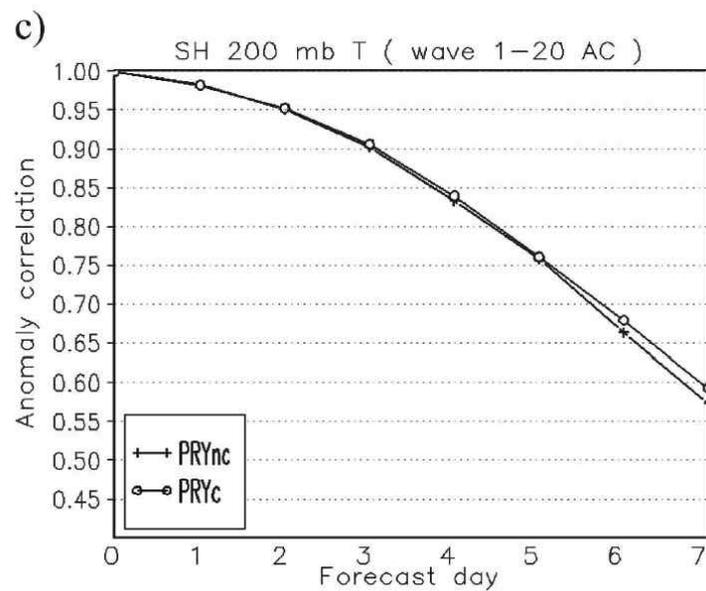
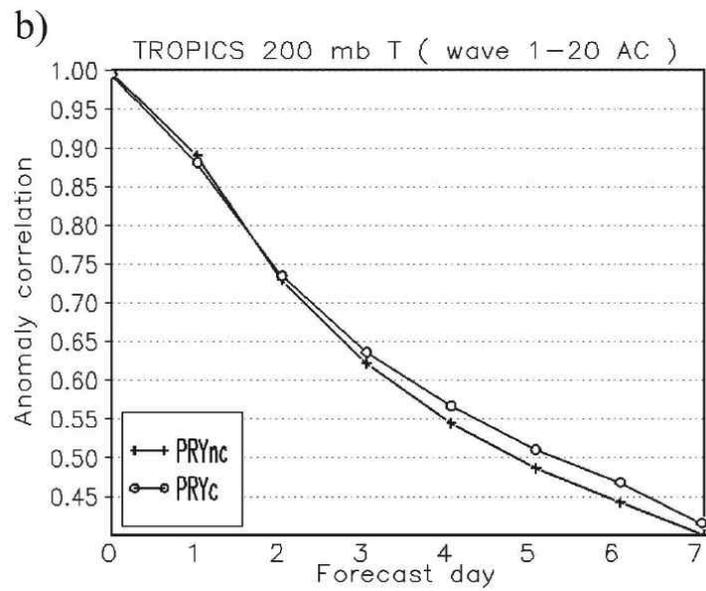
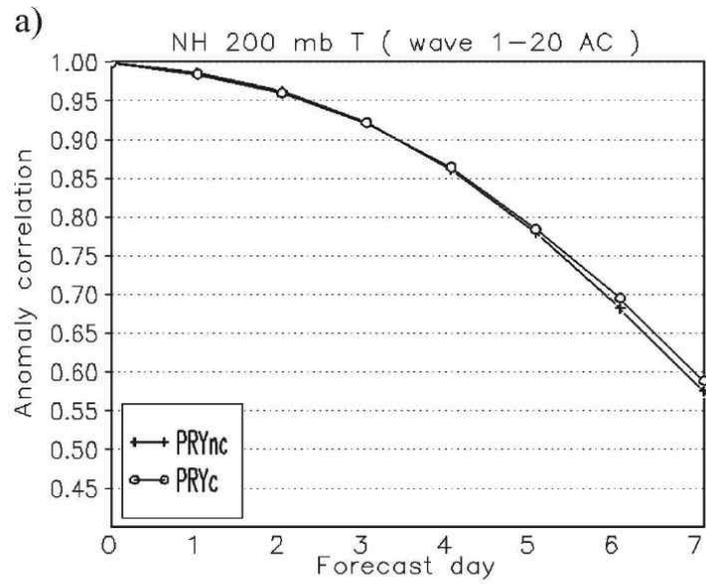


그림 1. 예보선행시간의 함수로 주어진, 200-hPa 온도에 대한 아노마리 상관계수. (a) 북반구 중위도, (b) 적도, (c) 남반구 중위도 (Cucurull and Derber, 2008).

영국 기상청 (United Kingdom Met Office; UKMO)에서는 현업 예보에서 사용하는 전구 대기 모형 (Unified Model; UM)과 4차원 변분 자료동화 방법을 이용하여, GPS RO 관측자료의 동화에 있어 관측오차와 동화에 사용되는 관측변수의 영향에 대한 연구를 수행함. 굴절률 (refractivity)과 꺾임각 (bending angle)에 대한 비교실험을 통해, GPS RO 자료동화를 위한 관측변수로 꺾임각을 선택. 남반구 중위도 지역에서 상대적으로 뚜렷한 개선효과가 나타나는 것을 확인함 (Rennie, 2010; 그림 2).

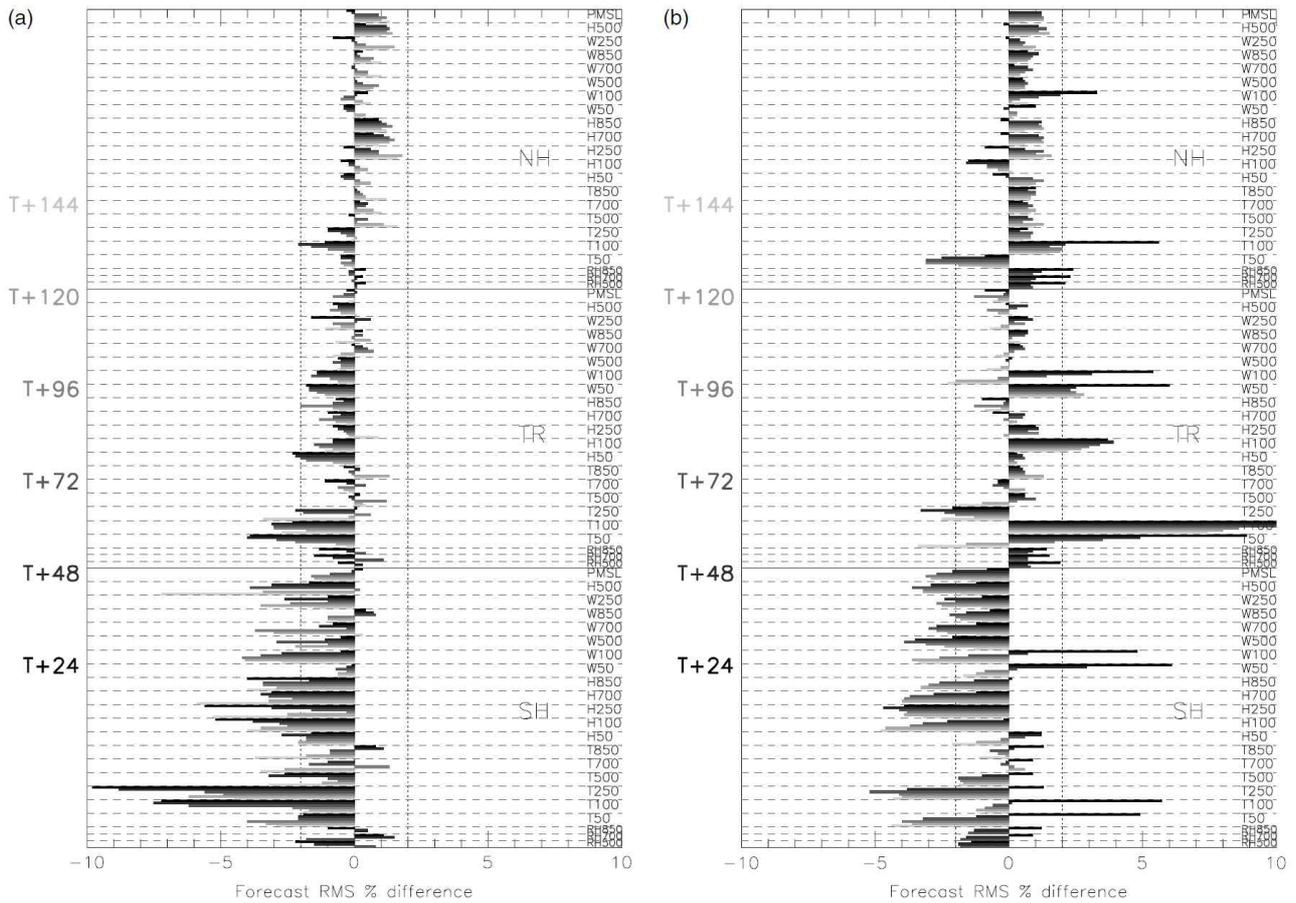


그림 2. COSMIC GPS RO 자료를 동화한 실험과 동화하지 않은 실험 사이의, 근제곱평균오차의 차이. 참고으로 (a) 관측자료, (b) 분석장을 사용한 경우 (Rennie, 2010).

유럽중기예보센터 (European Centre for Medium-range Weather Forecasts; ECMWF)에서는 4차원 변분 자료동화 방법을 이용한 GPS RO 관측자료의 동화가 ERA Interim 재분석자료의 품질에 미치는 영향을 분석함. GPS RO 관측자료의 동화를 통해, 대류권계면 및 성층권 하부에서의 음의 온도 편차 (cold bias)가 줄어들고, 적도 지역에서의 수증기와 남반구 및 적도 지역에서의 상층 바람 오차가 줄어드는 것을 확인함 (Poli et al., 2010; 그림 3).

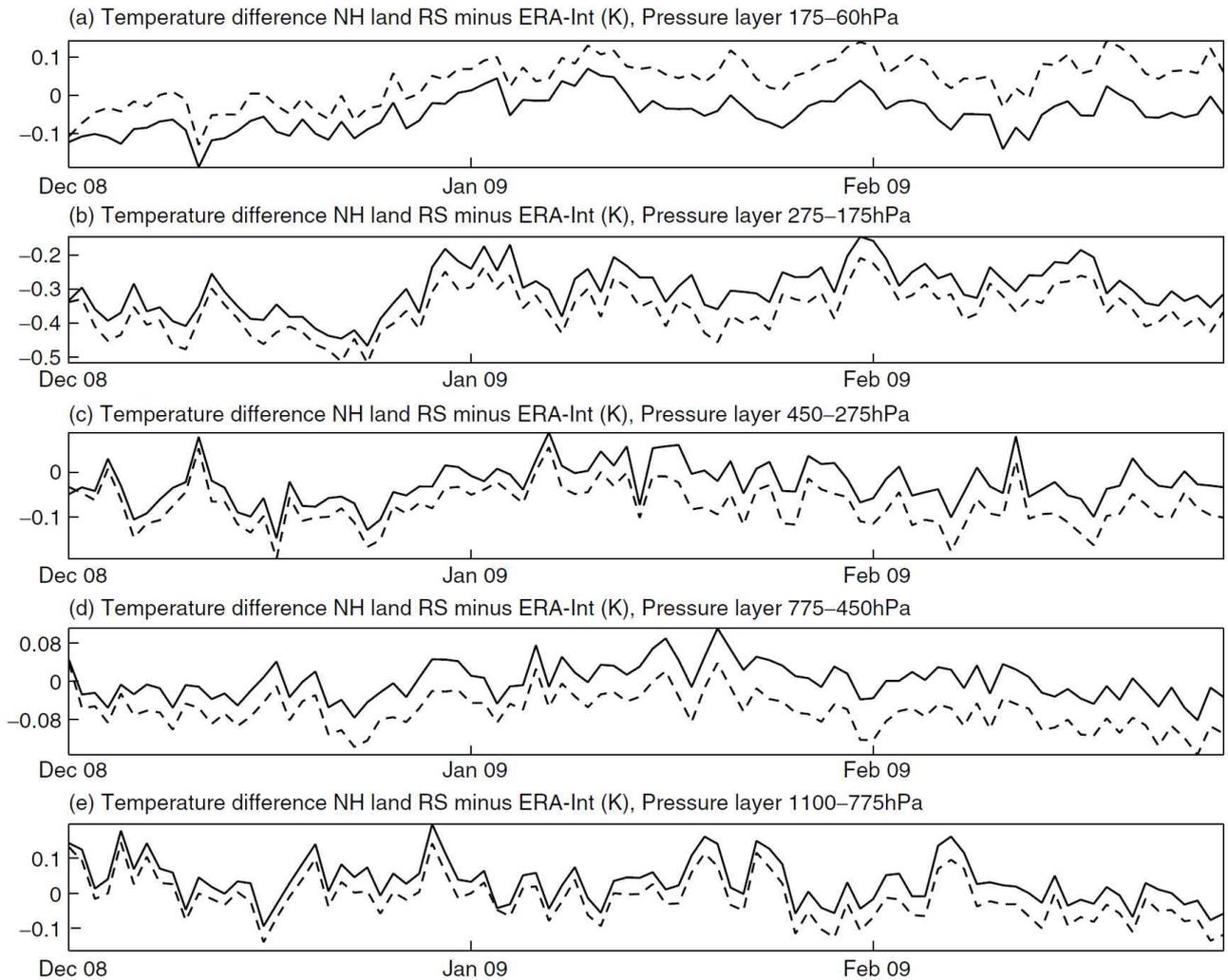


그림 3. 5개의 연직층에서의, 북반구 중위도 지역에서 계산한 라디오존데 관측과 ERA Interim 재분석자료의 온도 변수 차이. 표준실험 (실선)과 GPS RO 자료를 동화하지 않은 실험 (점선)의 결과 (Poli et al., 2010).

독일 기상청 (Deutscher Wetterdienst; DWD)에서는 관측공간에서의 3차원 변분 자료동화 방법을 이용하여 GPS RO 관측자료의 동화 효과를 분석함. GPS RO 관측자료 동화는, 변수 측면에서 (GPS RO 자료와 직접적 연관이 있는) 온도, 습도 외에 바람 변수까지, 그리고 지역 측면에서 (관측자료의 양이 상대적으로 적은) 남반구 외에 적도와 북반구까지, 대류권 상부와 성층권 하부 (Upper Troposphere and Lower Stratosphere; UTLS)의 분석장과 예보장을 향상시키는 효과가 있음을 보임 (Anlauf et al., 2011; 그림 4).

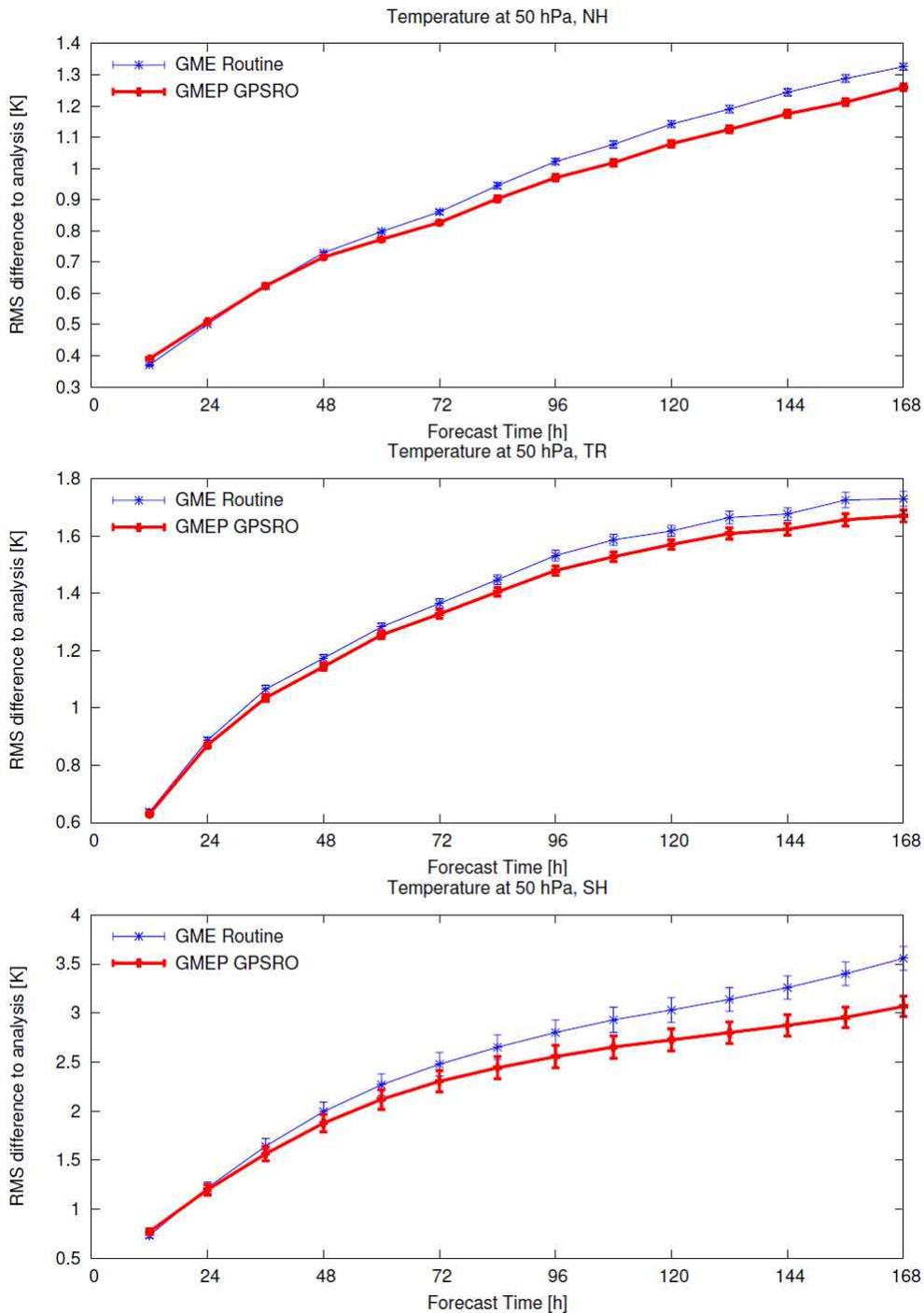


그림 4. 자체 분석장을 기준으로 계산한, 50-hPa 온도 변수에 대한 근제곱평균오차의 예보선행시간에 따른 변화. 현업자료동화실험 (파란색)과 GPS RO 관측자료를 추가로 동화한 실험 (빨간색) 비교 (Anlauf et al., 2011).

미국 국립대기과학연구소 (National Center for Atmospheric Research; NCAR)에서는 중 규모 대기 모형인 MM5 (The fifth-generation PSU/NCAR Mesoscale Model) 모형과 4차원 변분 자료동화 방법을 이용하여 GPS RO 관측자료 동화의 남극 지역 날씨 예측에의 영향을 정량적으로 분석함. GPS RO 관측자료의 동화는, 대류권 상부와 성층권 하부의 온도 변수를 개선하여 저기압 발달 모의에 기여함. 온도 변수 외에도, 습도, 압력, 바람 변수의 예측오차 감

소에 기여하며, 이러한 효과는 5일까지 유효한 것으로 확인됨 (Wee et al., 2008; 그림 5).

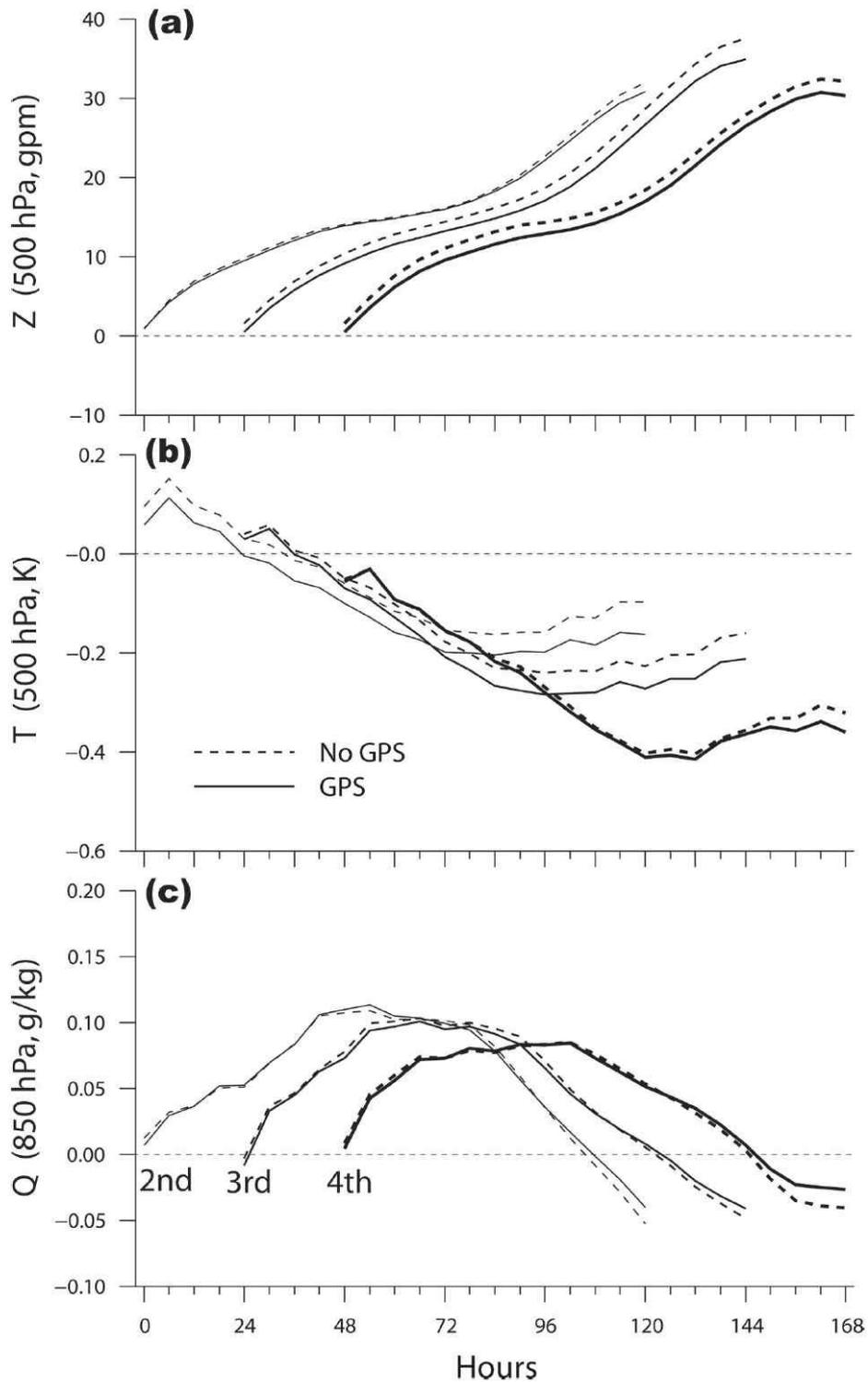


그림 5. 2번째부터 4번째 자료동화 사이클에 대한, 예보오차의 시간에 따른 변화. (a) 500-hPa 지위고도, (b) 500-hPa 온도, (c) 850-hPa 비습. GPS 관측자료를 동화한 실험 (실선)과 동화하지 않은 실험 (점선)의 비교 (Wee et al., 2008).

Bowler (2020)에서는 영국 기상청의 현업 예측시스템을 이용하여, OSE 실험을 수행하고,

Spire의 큐브위성으로부터 획득한 GNSS RO 관측자료의 동화 효과를 정량적으로 분석함. Spire 큐브위성의 GNSS RO 관측자료 동화가 예측성능에 긍정적인 영향을 줌을 확인함 (그림 6).

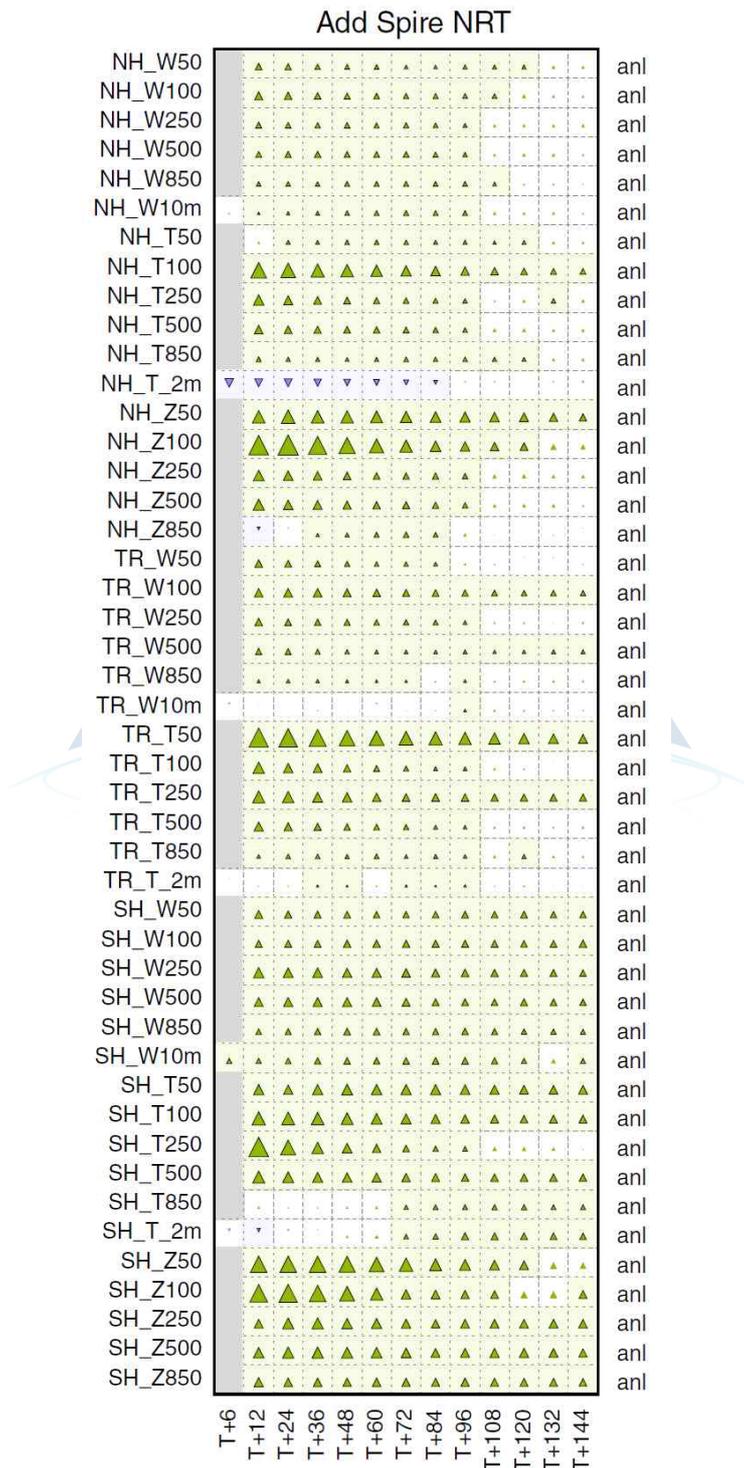


그림 6. 예보선행시간과 지역/변수에 따른, 기준 실험과 비교했을 때의 예보오차의 변화. Spire GNSS RO 관측자료를 추가로 동화한 실험의 결과 (Bowler, 2020).

미국 기상청에서는 CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) 위성으로부터 획득한 GPS RO 관측자료의 동화시, 관측변수의 종류 (bending angle과 refractivity)가 예측에 미치는 영향을 분석하여, 굴절률 (refractivity) 형태로 동화하는 것이 예측성을 더 높이는 것을 밝힌 바 있음 (Cucurull et al., 2007; 그림 7).

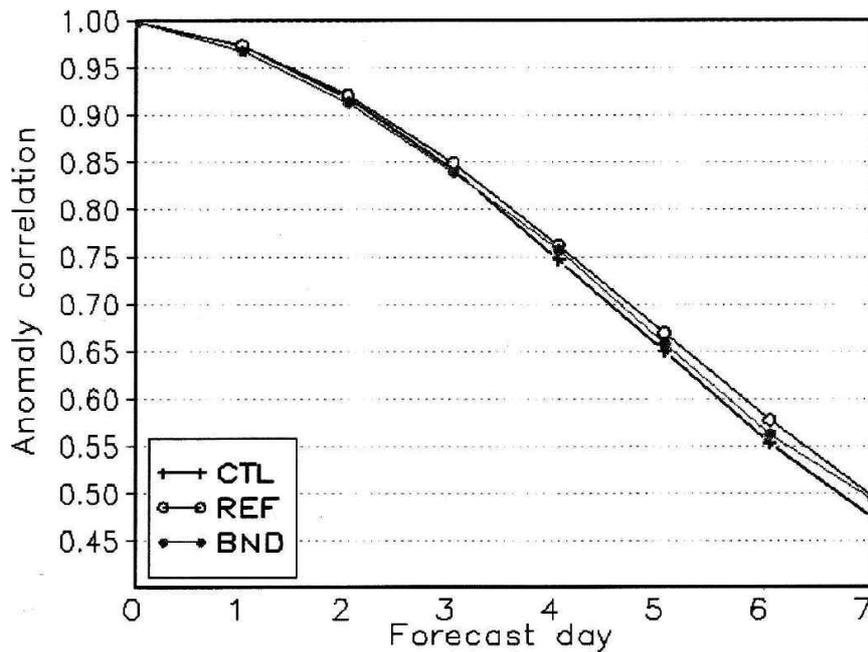


그림 7. 남반구 지역에 대해 계산한, 200-hPa 온도 변수에 대한 아노말리 상관관계수의 예보선행시간에 따른 변화. 기준실험 (CTL), 굴절률 동화 실험 (REF), 그리고 꺾임각 동화실험 (BND)의 비교 (Cucurull et al., 2007).

미국 국립대기과학연구소에서는 AR (Atmospheric River) 사례에 대해 3차원 변분 자료 동화 방법을 이용하여 GPS RO 관측자료의 동화 실험을 수행하고, refractivity 형태로 GPS RO 관측자료를 동화하는 경우, local observation operator (관측연산자)보다는 nonlocal observation operator를 사용하는 것이 예측성을 높이는 데 기여함을 보임 (Ma et al., 2011; 그림 8). Nonlocal excess phase observation operator는 local observation operator에 비해, 수평 방향 경도가 큰 상황에서 효과적임을, 실제 관측자료를 이용한 실험에서 확인함.

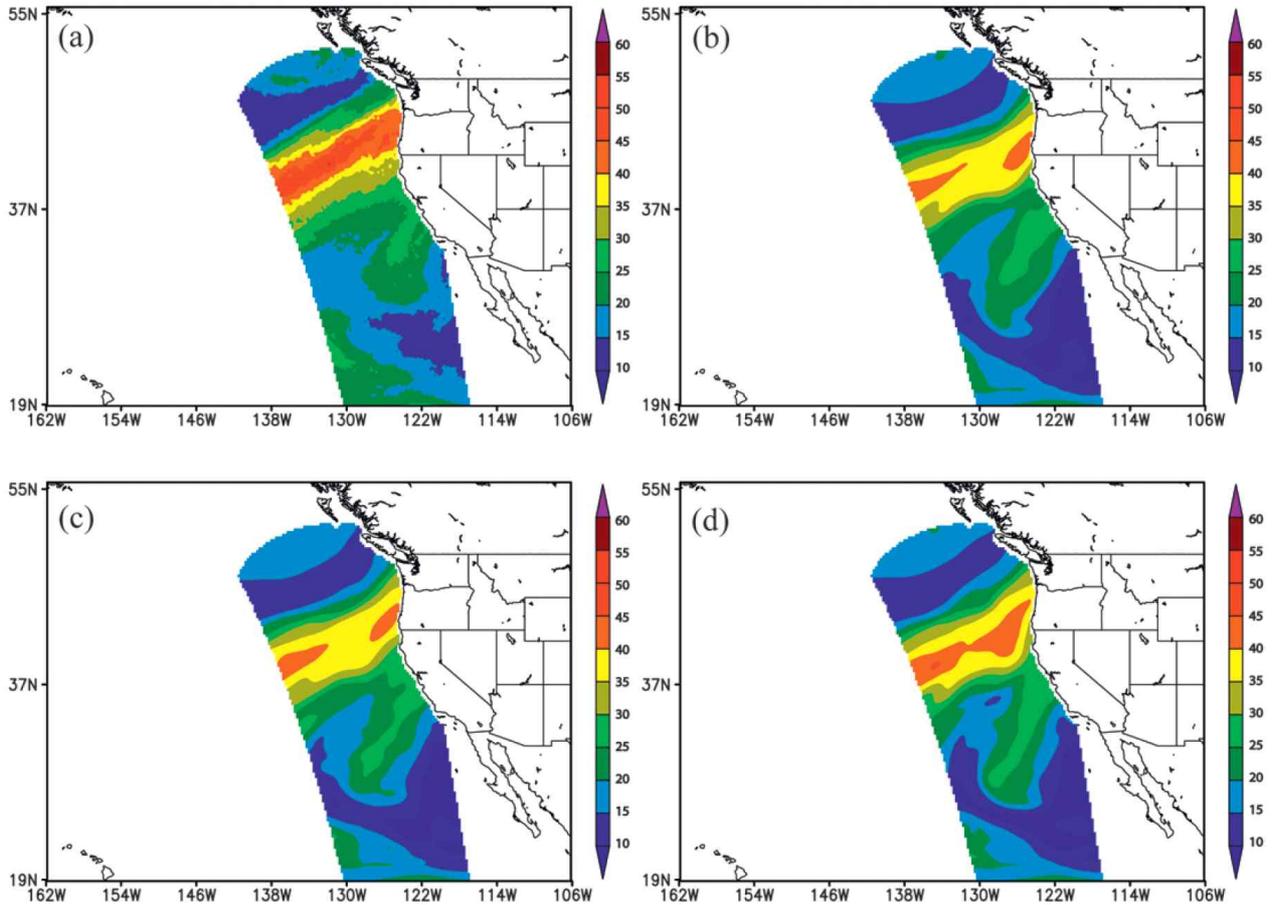


그림 8. SSM/I IWV (연직 적분한 수증기량) 관측과 수치예측 결과의 비교. (a) SSM/I 관측, (b) CTRL (기준실험), (c) LOC (local operator 사용 실험), (d) NLOC (nonlocal operator 사용 실험)의 비교 (Ma et al., 2011).

극지연구소

## 제 2 절 국내 연구동향

국내에서도 기상청 현업예보에 GPS RO 관측자료 동화가 포함되어 있으나, 관련 연구가 해외에 비해서는 활발하게 진행되고 있지는 않음. 한국형수치예보모델개발사업단 (Korea Institute of Atmospheric Prediction System; KIAPS)에서는 자체 개발한 전구 대기 모형, KIM (Korea Integrated Model)과 3차원 변분 자료동화 방법을 이용한 GPS RO 관측자료 동화시, 관측자료의 연직 해상도에 대한 민감도 실험을 수행하고 관측자료의 해상도가 높을수록 예보 성능이 향상되는 것을 확인함 (Ha et al., 2018; 그림 9).

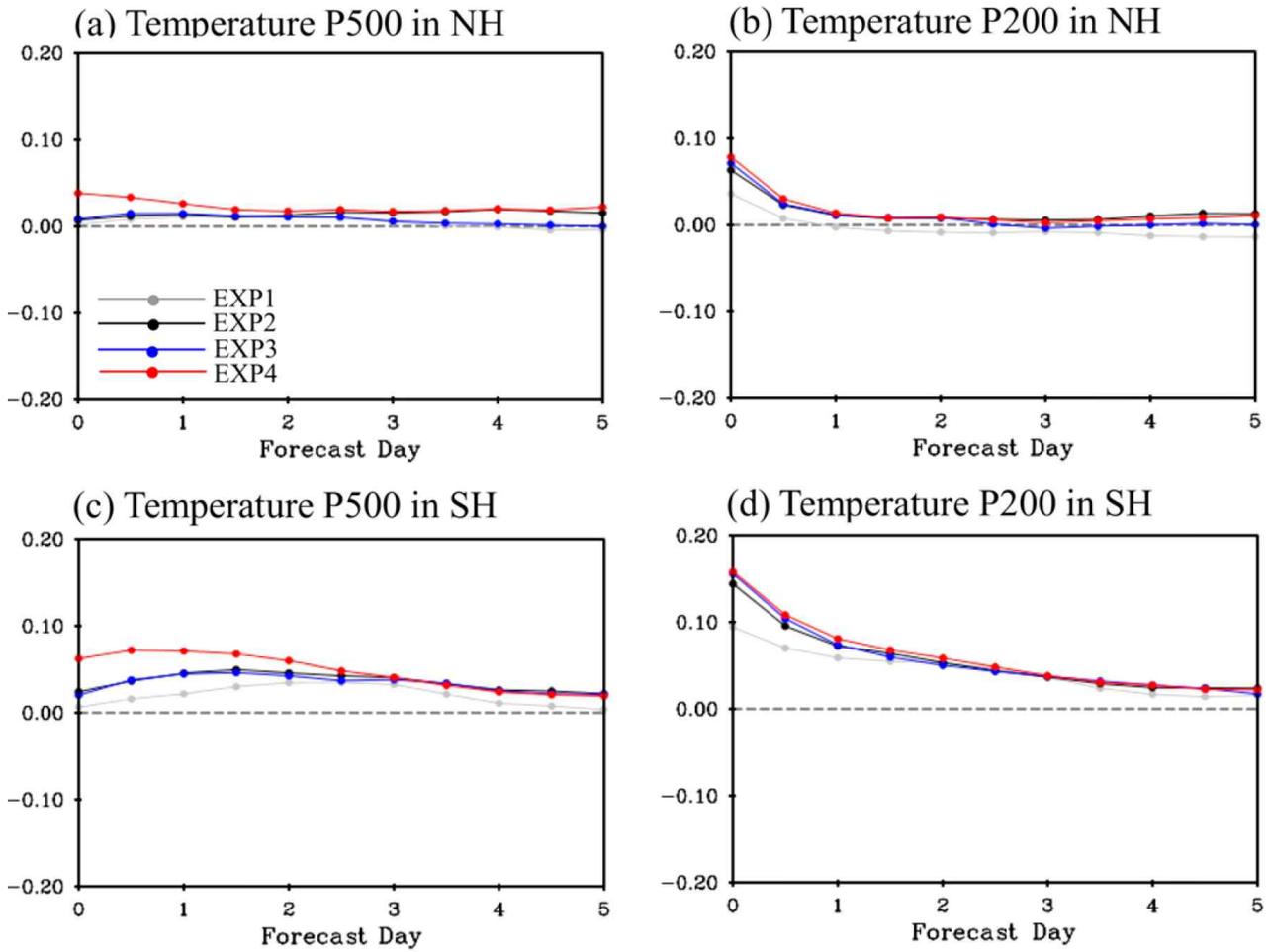


그림 9. 예보선행시간의 함수로 나타낸, 근제곱평균오차의 향상 (양의 값일 경우) 정도. (a) 북반구 500-hPa 온도, (b) 북반구 200-hPa 온도, (c) 남반구 500-hPa 온도, 그리고 (d) 남반구 200-hPa 온도. EXP1~4는 관측자료 연직 해상도가 각각 2 km, 1 km, 500 m, 그리고 200 m인 실험 (Ha et al., 2018).

### 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

#### 제 1 절 대기모형과 변분 자료동화 방법을 이용한 GPS RO 관측자료 동화 및 예측 실험 수행

##### 1. 지역규모 대기모형의 선택 및 설치

북극 지역 날씨 예측을 위한 지역규모 대기모형으로는 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock et al., 2008) 모형을 선택하였다. WRF 모형은 미국 NCAR에서 개발한 커뮤니티 모형으로, 연구 목적 외에도 현업 예보에도 활용되는 최신의 중규모 모형이다. 구축된 KPOPS-Weather 시스템도 WRF 모형을 기반으로 하고 있으며, KPOPS-Weather 시스템에서의 활용을 염두에 두고 최신 버전이 아닌 (KPOPS-Weather와 같은) 3.7.1 버전을 연구소 계산서버에 설치하였다. WRF 모형 수행을 위한 흐름도는 그림 10과 같다.

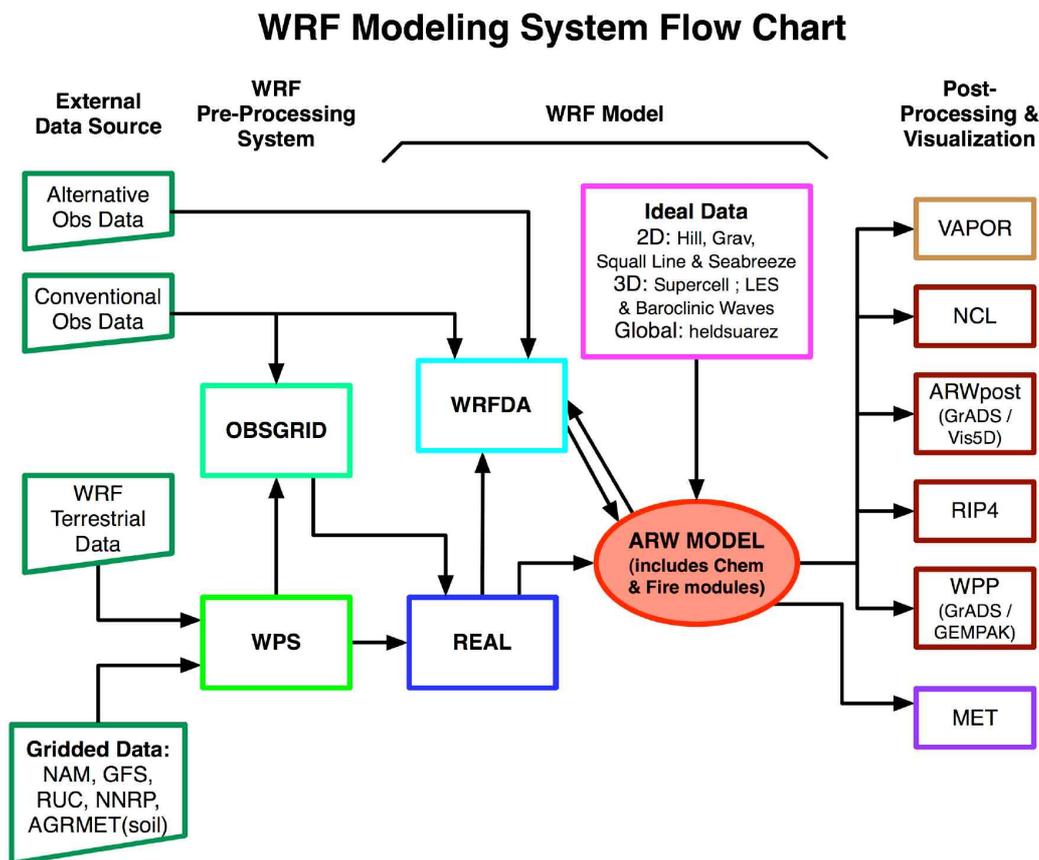


그림 10. WRF 모형 수행 흐름도 (WRF Tutorial Presentation에서 발췌).

WRF 모형을 수행하기 위해서는, 일종의 전처리 과정인 WPS (WRF Preprocessing

System) 과정을 거쳐야 하는데 WPS는 geogrid (모형 수행을 위한 모의영역을 설정), ungrib (특정 포맷의 전구모형 분석장과 예보장을 디코딩하는 과정), metgrid (geogrid 단계에서 설정한 모의영역으로 ungrib 단계에서 디코딩한 전구모형 아웃풋을 내삽하는 과정)의 3단계로 구성된다. WRF 모형 수행을 위한 모의영역은 27 km 수평해상도를 갖는, 북극해를 중심으로 한반도까지 포함하는 영역으로 그림 11과 같다. 모형 수행을 위한 초기 (자료동화 과정 제외) 및 측면경계조건으로는, (실시간 예측을 염두에 두고) 미국 NCEP에서 운영중인 GFS 분석장과 예보장을 사용하였다. WPS 수행 후 WRF 모형을 수행하기 전, real이라는 과정을 통해 연직 방향 내삽을 진행하고, WRF 모형 수행을 위한 물리과정으로는 선행연구 결과를 참조하여, Kain-Fritsch 적운모수화방안 (Kain, 2004), Morrison 미세물리방안 (Morrison et al., 2009), MYJ 대기경계층방안 (Janjic, 1994), RRTMG 장파 및 단파 복사물리방안 (Iacono et al., 2008), 그리고 Noah 지면모형 (Tewari et al., 2004)을 사용하였다.

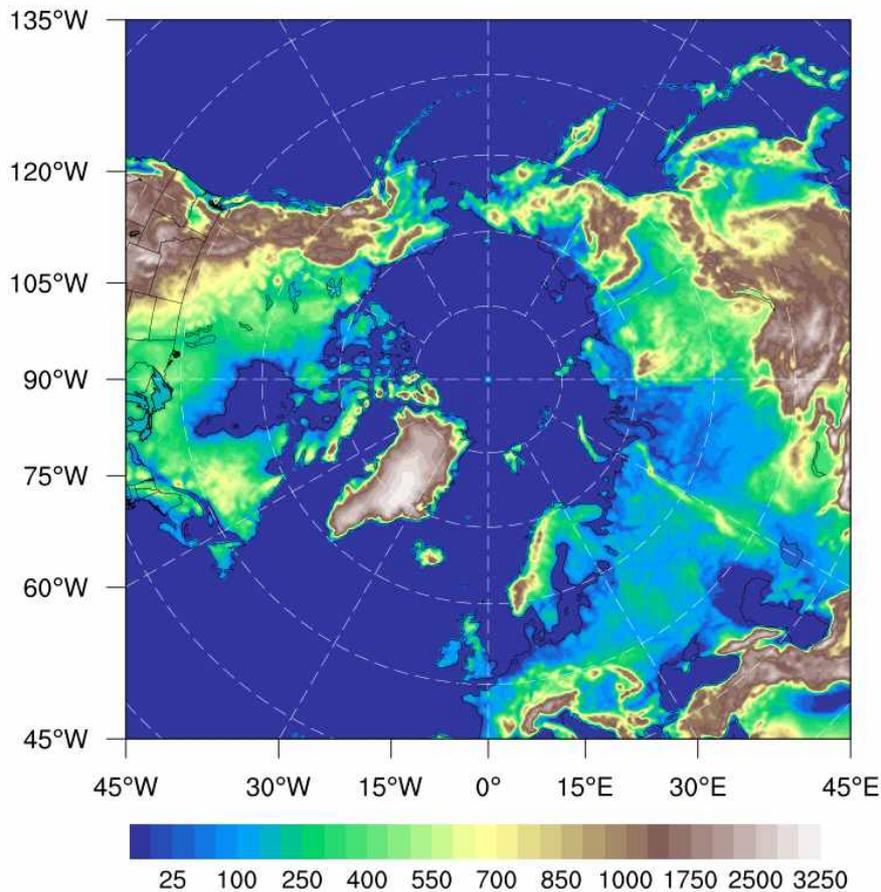


그림 11. WRF 모형의 모의영역과 지형고도.

## 2. 자료동화시스템의 선택 및 설치

WRF 모형과 사용할 자료동화시스템으로 WRFDA (WRF Data Assimilation; Barker et al., 2012) 시스템을 선택하여 연구소 계산서버에 설치하였다. WRFDA 시스템은 여러 가지 자료동화 방법을 포함하고 있으나, 계산시간을 고려하여 3차원 변분 자료동화 방법 (Three

Dimensional Variational method; 3D-Var)을 선택하였다. WRF 모형의 초기조건을 개선하기 위한 WRFDA 시스템의 활용 모식도는 그림 12에 제시되어 있다.

## WRFDA in the WRF Modeling System

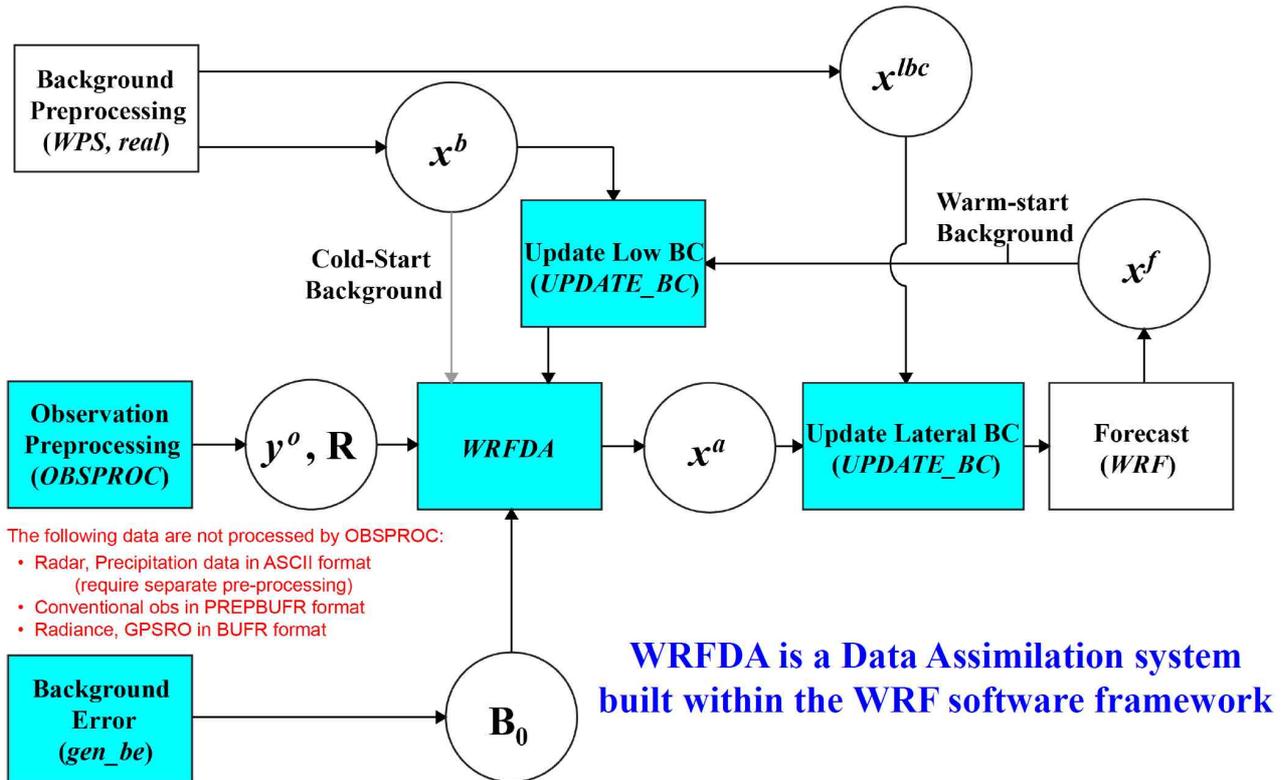


그림 12. WRFDA 시스템의 모식도 (WRFDA Tutorial Presentation에서 발췌).

배경오차공분산 (background error covariance)은 WRFDA 시스템 내 gen\_be 유틸리티를 활용하여, NMC 방법 (Parrish and Derber, 1992)으로 계산하였다. 구체적으로, 24시간 예보와 12시간 예보의 차이를 배경오차라 가정하고, 한 달 이상의 기간 (일변화를 배제하기 위하여, 00 UTC와 12 UTC에 시작하는 예보)에 대하여 배경오차의 기후학적인 (climatological) 통계량을 계산하였다.

WRFDA 시스템에서는, 라디오존데, 항공기, 윈드 프로파일러, 선박, 부이, 지상 관측 등 종관 관측자료 (conventional observation) 외에도 위성 복사휘도 (satellite radiance), 위성으로부터 산출한 바람, 그리고 GPS RO 관측자료를 동화할 수 있다. 미국 NCEP의 현업 전구 대기 자료동화 시스템 (GDAS)에서 동화에 활용되는 다양한 종류의 관측자료 (BUFR 포맷)를 NCEP 웹사이트로부터 다운로드하여 자료동화를 수행하였다.

GPS RO 관측은, GPS/GNSS 위성에서 발신한 라디오파를 LEO 위성이 수신하는 과정에서, 대기의 전자밀도, 온도, 습도에 의해 라디오파가 굴절되는 현상을 이용한다 (그림 13). 위성 복사휘도 관측의 경우, 적외 센서 관측은 (일반적으로 clear-sky assimilation을 사용하나 최근에는 all-sky assimilation으로 확장되는 추세임) 대기 중 구름이나 강수 현상이 있는 경우 사용이 제한되고 마이크로파 관측은 표면조건이 해빙이나 눈인 경우 (emissivity 결정의 어려움)

사용이 제한되는 한계가 있다. 반면 GPS RO 관측은 기상조건이나 표면조건에 관계없이 사용할 수 있고, 나아가 연직방향의 해상도와 정확도도 높은 장점을 갖고 있어, 극 지역에서의 활용성이 높다고 할 수 있다. 최근에는 미국 기상회사 (예, GeoOptics, Spire 등)를 중심으로 초소형위성 (혹은 큐브위성)을 LEO 위성으로 활용하는 시도가 활발하게 이루어지고 있어, 자료 동화에 활용할 수 있는 GPS/GNSS RO 관측자료의 수가 증가할 것으로 기대된다 (그림 14).

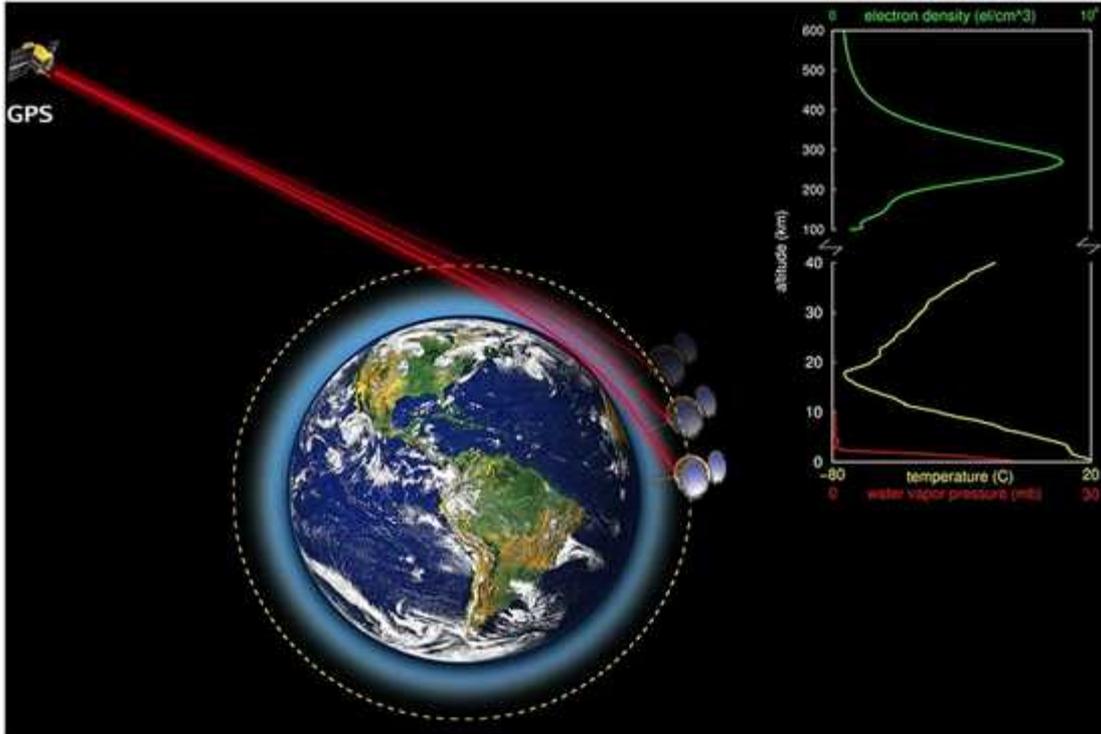


그림 13. GPS RO 관측의 원리 (Yue et al., 2014).

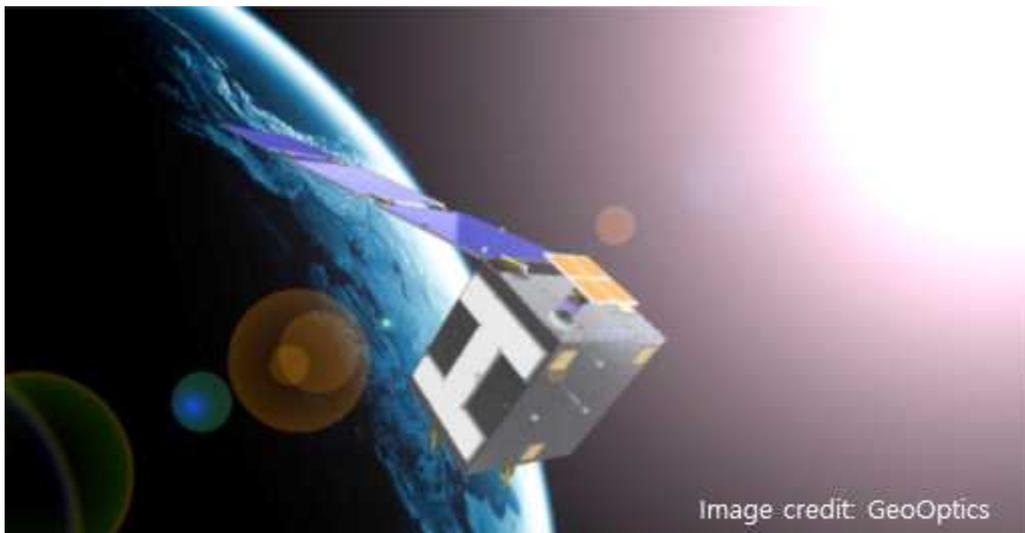


그림 14. 큐브위성을 이용한 GPS RO 관측 프로젝트, CICERO의 예시 (GeoOptics에서 발췌).

GPS RO 관측자료는 처리 정도 (processing level)에 따라 여러 형태를 갖게 되는데, 일

반적으로 꺾임각 (bending angle)이나 굴절률 (refractivity) 형태로 동화에 활용된다. 전문가 자문결과를 바탕으로, 모형 꼭대기의 높이가 높지 않은 지역규모 모형에서는 굴절률 변수로 동화하는 것이 적절하다고 판단하였다. 또한 굴절률 변수 동화시, 관측연산자로는 local observation operator와 nonlocal observation operator를 사용할 수 있는데, 수평 방향의 경도가 크지 않다고 가정하여 (전문가 자문의견을 고려하여) local observation operator를 선택하였다.

관측자료 동화가 예측에 미치는 영향을 알아보는 방법으로는 크게 두 가지가 있는데, 하나는 관측 시스템 실험 (Observation System Experiment; OSE) 방법이고, 다른 하나는 2절에서 다룬 관측민감도 (Forecast Sensitivity to Observation; FSO) 실험 방법이다. OSE 실험에서는 관심을 두고 있는 관측종을 제거하거나 추가하여 자료동화 및 예측을 수행하고, 이를 기준실험과 비교한다. 쇄빙선 아라온호의 2019년 북극 항해 기간 (2019년 8월 5일 ~ 2019년 9월 18일)에 대해, 6시간 간격으로 자료동화를 수행하고, 24시간마다 00 UTC에는 10일 예보를 수행하였다. 총 4개의 실험 (CTL, NoGPS, GEOOPT, SPIRE)을 수행하였는데, CTL 실험에서는 종관 관측, 위성 복사휘도 관측, 그리고 GPS RO 관측을 동화하였다. NoGPS 실험에서는 GPS RO 관측을 제외한 종관 관측과 위성 복사휘도 관측만을 동화하였고, GEOOPT (SPIRE) 실험에서는 CTL 실험에서 동화한 관측 외에 GeoOptics (Spire) 기상회사의 큐브위성에서 획득한 GPS RO 관측을 추가로 동화하였다 (Spire 큐브위성 GPS RO 관측자료는 2019년 8월 19일부터 25일까지만 확보하여 실험기간이 다른 실험에 비해 짧음). CTL 실험과 NoGPS 실험의 비교를 통해 GPS RO 관측자료의 동화가 북극 지역 날씨 예측에 미치는 영향을, 그리고 CTL 실험과 GEOOPT (혹은 SPIRE) 실험의 비교를 통해 (현재 현업기관에서 사용되지 않는) 상업용 큐브위성에서 획득한 GPS RO 관측자료의 추가 동화가 북극 지역 날씨 예측에 미치는 영향을 파악할 수 있다.

## 제 2 절 수반모형 기반의 관측민감도 실험 수행

### 1. 관측민감도 실험 수행을 위한 수반모형 설치

1절에서 언급한 OSE 실험은 특정 관측종의 동화 효과를 직접적으로 분석할 수 있는 장점이 있으나, 고려해야 하는 관측종의 수가 늘어나면 수행해야 하는 실험의 수가 많아지는 단점이 있다. 반면에 관측민감도 (FSO)는 자료동화에 사용되는 모든 관측종의 동화 효과를 한번에 평가할 수 있는 장점이 있어 대부분의 현업기관에서 사용한다. 관측민감도를 계산하기 위해서는, 예측에 사용되는 비선형모형에 대한 수반모형을 이용하거나, 앙상블 자료동화체계를 갖추고 있어야 한다. 수반모형 기반 관측민감도 실험을 수행하기 위하여, WRF 모형에 대한 수반모형 (WRFPLUS; Zhang et al., 2014)을 연구소 계산서버에 설치하였다.

### 2. 수반모형 기반 관측민감도 실험 수행

수반모형을 이용한 관측민감도 계산은 그림 15에서와 같이, 자료동화 수행 1회, 비선형모형 적분 2회, 수반모형 적분 2회, 그리고 자료동화시스템에 대한 수반모형 수행 1회의 과정을 거쳐 이루어진다. 수반모형을 위한 관측민감도 계산을 위해, 전문가 자문결과를 바탕으로, 예보 길이 (forecast length), 예보오차 정의를 위한 기준값 (reference or truth), 반응함수 (response function) 정의를 위한 메트릭 (metric or norm), 그리고 근사 정도를 결정하였다. 예보길이는 선형가정 (linear assumption)과 계산시간을 고려하여 6시간으로, 기준값은 자료동화-예보 사이클의 자체 분석장으로, 메트릭은 건조 총 에너지 (dry total energy)로, 그리고 근사정도는 3차 근사의 변형으로 결정하였다.

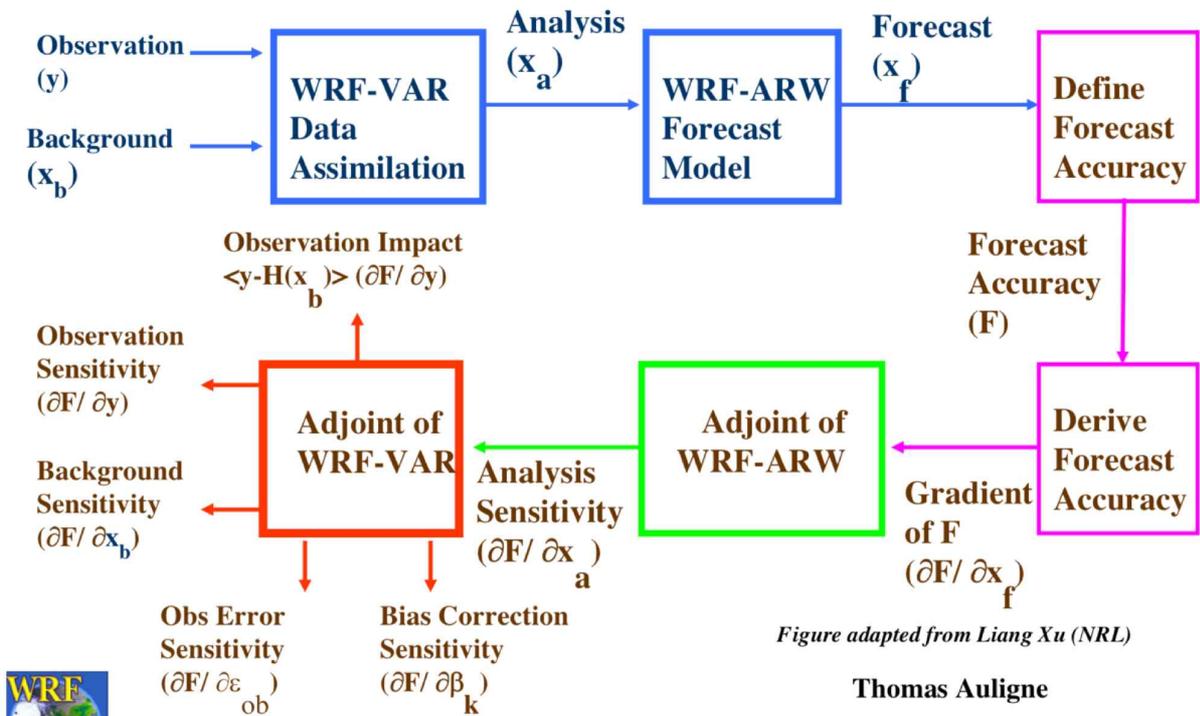


그림 15. 수반모형 기반 관측민감도 실험의 진행 과정 모식도 (WRFDA Tutorial Presentation에서 발췌).

### 제 3 절 GPS RO 관측자료의 동화가 북극 지역 날씨 예측에 미치는 영향 분석

#### 1. 관측 시스템 실험 (OSE) 결과

어떠한 관측종의 동화가 예측오차의 증가 혹은 감소에 어느 정도 기여를 하는지는 두 가지 방법을 통해 알 수 있다. 하나는 관측 시스템 실험 (OSE)을 수행하여, 동화과정에서 특정 관측종을 빼거나 더해 규준실험과 비교하는 것이다. 다른 하나는 관측민감도 실험 (FSO)을 수행하여, 동화에 사용된 모든 관측종의 상대적인 기여를 평가하는 것이다. 이번 절에서는 관측

시스템 실험 (앞으로는 OSE로 명명) 결과를 분석하고, 다음 절에서는 관측민감도 실험 (앞으로는 FSO로 명명) 결과를 분석하여, GPS RO 관측자료의 동화가 북극 지역 날씨 예측에 미치는 영향을 제시하고자 한다.

그림 16, 17은 실험 기간 중 임의의 날짜인, 2019년 8월 20일에 동화에 사용된, GeoOptics와 Spire의 큐브위성으로부터 획득한 GPS RO 관측자료의 공간적인 분포를 나타낸다. 기상회사 Spire는 많은 수의 큐브위성을 운영하고 있어, 현재 현업에서 동화에 사용되는 GPS RO 관측자료의 수만개의 관측을 추가적으로 제공할 수 있다. 기상회사 GeoOptics의 큐브위성은 그만큼 많지는 않지만, 관측자료의 수가 부족한 북극해 지역의 온도와 습도 프로파일을 제공해 주는 역할을 할 수 있다. 본 연구에서는, GeoOptics와 science data license를 체결하여 전체 실험기간 (2019년 8월 5일~9월 18일)에 대한 자료를 공급받았고, Spire의 자료는 일부 기간 (2019년 8월 19일~25일)에 대해 구매하였다.

**Geographical distribution of GeoOptics GPS RO data**

**Geographical location of Spire GPS RO data**

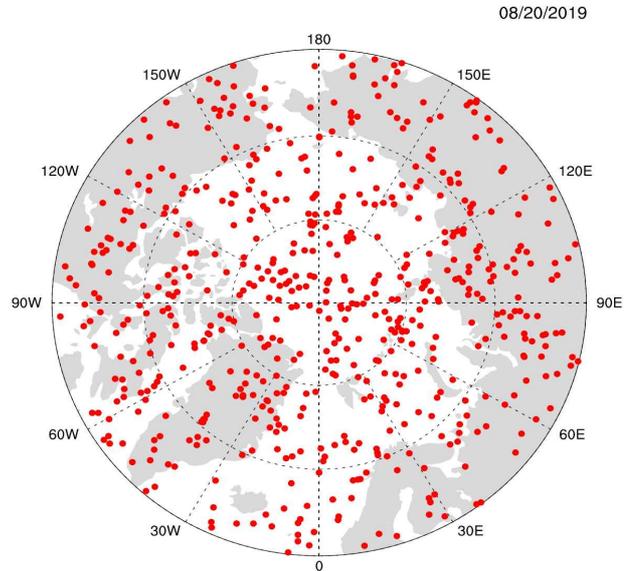
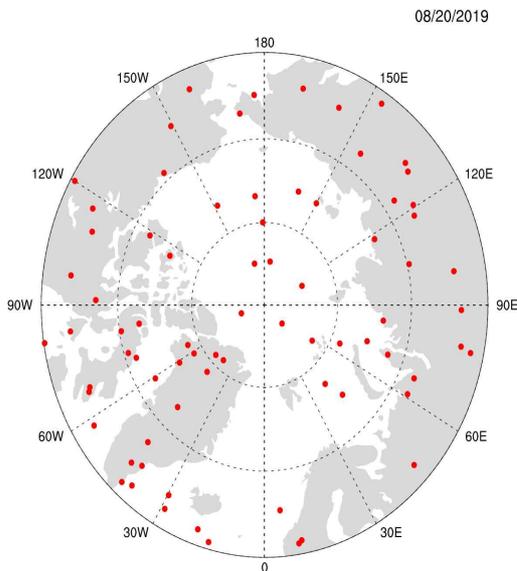


그림 16. GeoOptics 큐브위성 GPS RO 자료의 위치  
그림 17. Spire 큐브위성 GPS RO 자료의 위치 (2019년 8월 20일).

관측자료의 동화가 성공적으로 수행되었는지를 확인하기 위하여, 실험 기간에 대하여 O-B (observation minus background), O-A (observation minus analysis)를 계산하여 그림 18, 19, 20에 제시하였다. CTL 실험의 경우, 모든 자료동화 사이클에 대해, 굴절률 O-B와 비교하여 굴절률 O-A가 감소한 것을 확인할 수 있고 이를 통해 관측자료의 동화가 잘 이루어진 것을 알 수 있다. 동화에 사용된 GPS RO 관측자료의 수는 사이클에 따라 차이가 있지만, 10000에서 16000개 사이의 값을 갖는다. GeoOptics GPS RO 관측자료를 추가로 동화한 GEOOPT 실험에서도, O-B에 비해 O-A가 감소하여 자료동화가 성공적으로 수행된 것을 확인할 수 있고, 동화에 사용된 관측자료의 수는 18000개에서 27000개 사이로, CTL 실험에 비해 증가한 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 Spire GPS RO 관측자료까지 동화한 SPIRE 실험에

서도 O-B와 O-A의 비교를 통해, 자료동화가 적절하게 수행된 것을 확인할 수 있으며 동화에 사용된 관측자료의 수는 최대 45000개까지 증가하는 모습을 보인다.

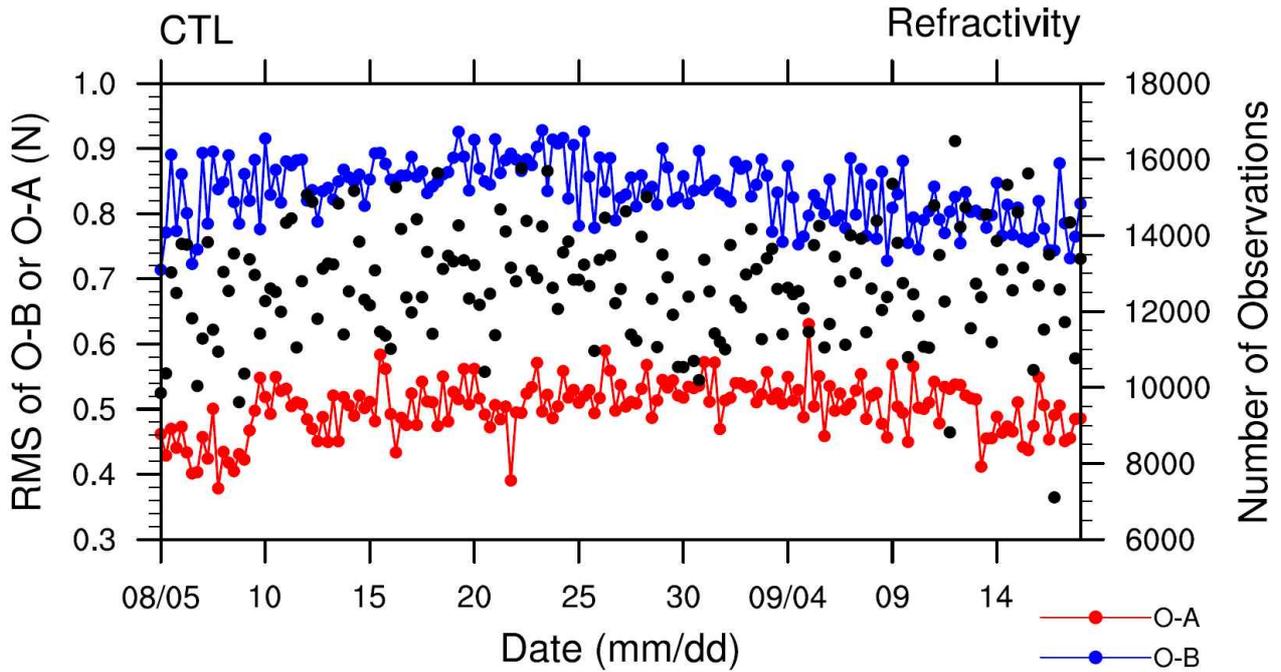


그림 18. CTL 실험에 대한, 2019년 8월 5일 00 UTC부터 9월 18일 00 UTC까지, 6시간 간격의 굴절률 변수에 대한 O-B (파란색), O-A (빨간색), 그리고 자료동화에 사용된 관측의 수 (검은색).

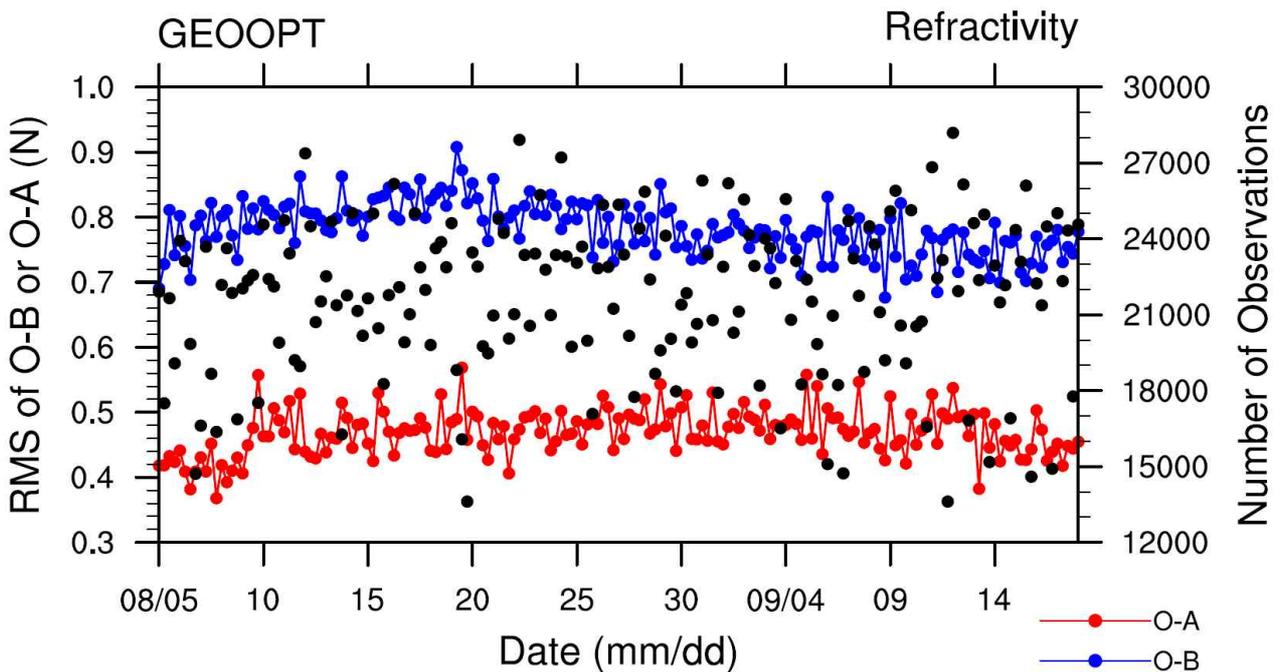


그림 19. 그림 18과 같으나, GEOOPT 실험에 대한 결과.

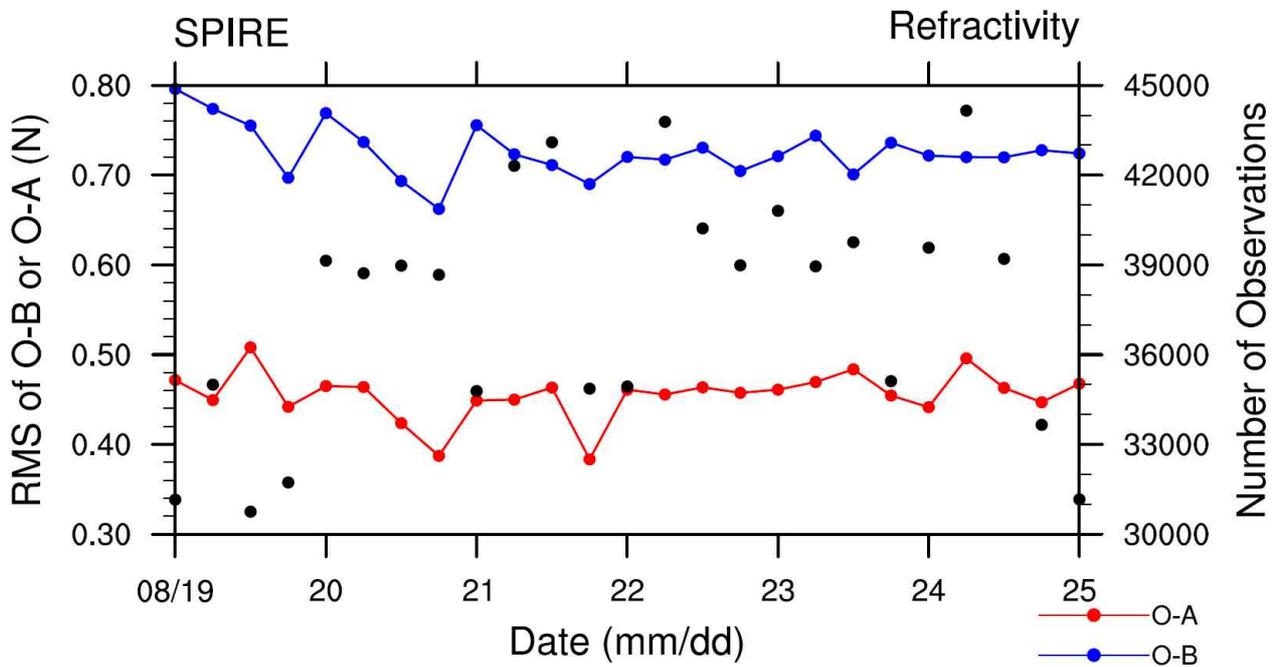


그림 20. 그림 18과 같으나, SPIRE 실험에 대한 결과.

그림 21은 실험 기간에 대해 평균한, 도메인 평균 분석 증분 (analysis increment, A-B)의 연직 분포를 나타낸다. 분석 증분은 자료동화 후의 분석장과 자료동화 전의 배경장의 차이로, 자료동화에 의해 특정 변수에 어떠한 변화가 생겼는지 나타낸다. NoGPS 실험과 GEOOPT 실험에 대해, CTL 실험 분석 증분과의 차이를 동서 방향의 바람, 남북 방향의 바람, 온도, 그리고 수증기 혼합비 변수에 대해 나타내었다. 동서 방향의 바람의 경우, 제트기류가 나타나는 고도 근처에서 분석 증분이 크게 나타나고 NoGPS 실험과 GEOOPT 실험의 부호가 반대인 것을 볼 수 있다. GEOOPT 실험에 비해, NoGPS 실험에서 분석 증분의 크기가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 남북 방향의 바람의 경우, 전반적인 특징은 동서 방향의 바람과 비슷하지만, 분석 증분이 가장 크게 나타나는 고도가 동서 방향의 바람에 비해, 낮은 고도임을 알 수 있다. 온도와 수증기 변수는 GPS RO 관측자료 동화 효과가 직접적으로 나타나는 변수로, NoGPS 실험과 GEOOPT 실험의 결과가 정반대의 부호를 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 기존의 GPS RO 관측자료와 큐브위성으로부터 획득한 새로운 GPS RO 관측자료가 서로 일관된 정보를 담고 있는 것을 나타낸다. 온도 변수의 경우, GPS RO 관측오차가 작은 (자료동화의 효과가 크게 나타나는) 상부 대류권 이상의 고도에서 분석 증분의 크기가 크게 나타나며, 수증기 변수의 경우, 수증기 변수의 고도에 따른 크기가 반영되어 상대적으로 낮은 고도에서 분석 증분의 최대값이 나타난다. GEOOPT 실험에 비해, NoGPS 실험의 분석 증분이 더 큰 것은 GEOOPT 실험의 경우, 기존의 GPS RO 관측자료가 존재하는 상황에서 새로운 GPS RO 관측이 추가되었기 때문에, 상대적으로 효과가 작아지기 때문이다.

### Difference in A-B

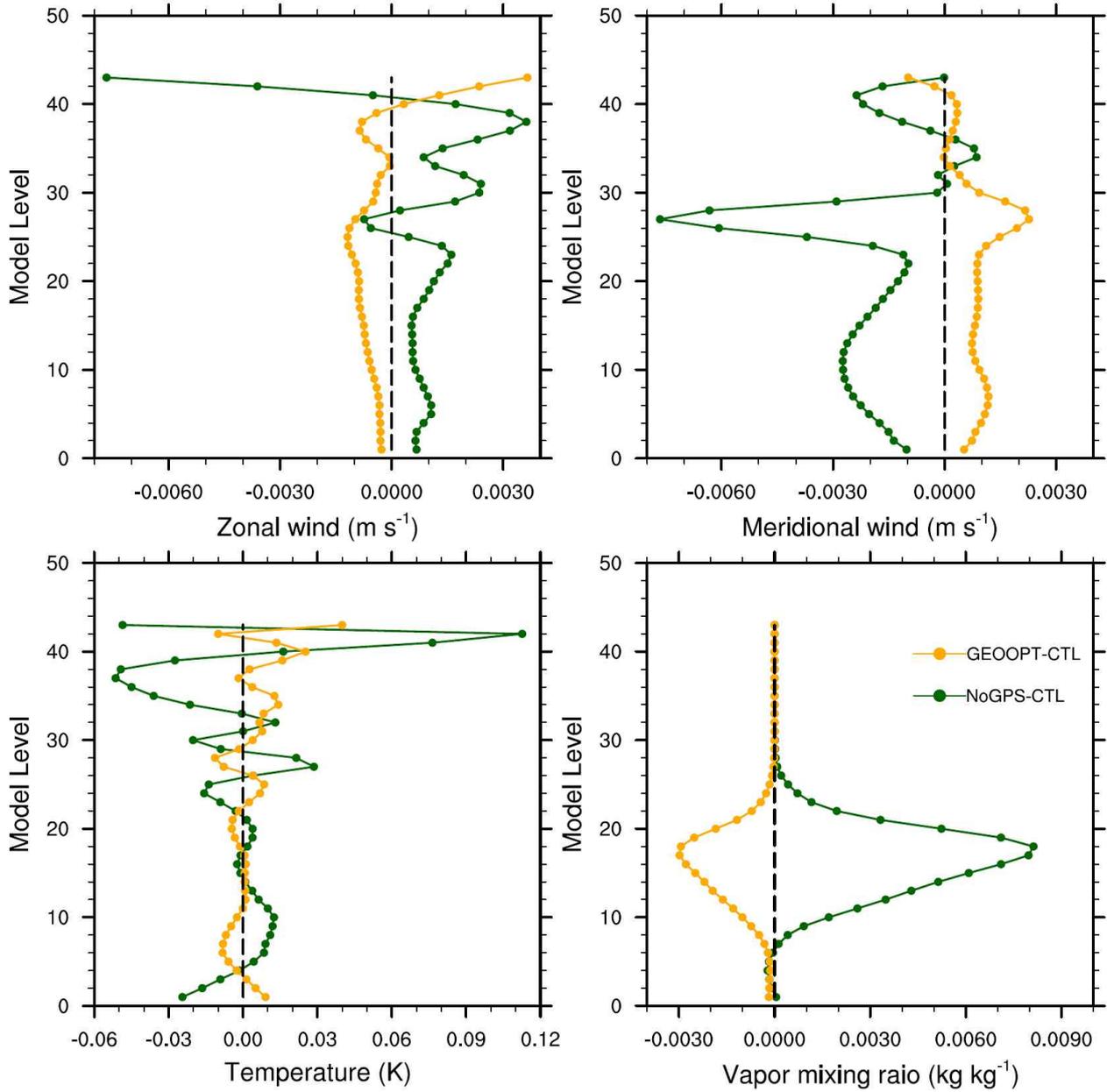


그림 21. 실험기간 내 모든 사이클 평균, 모의영역에 대해 평균한, 분석 증분 (A-B)의 연직 분포. 왼쪽 위부터 시계방향으로 동서 방향의 바람, 남북 방향의 바람, 수증기 혼합비, 그리고 온도. CTL 실험과의 차이를 NoGPS 실험 (초록색)과 GEOOPT 실험 (오렌지색)에 대해 나타냄.

예측결과를 검증할 때, 어떠한 자료를 기준값 (혹은 참값)으로 사용할 것인가는 중요한 사항이다. 일반적으로 재분석자료 (사용가능한 모든 관측자료의 정보가 반영된)를 기준값으로 사용하여 검증을 하는데, 극 지역의 경우, 여러 기관의 재분석자료간 차이가 큰 편이라 한계가 존재한다. 재분석자료 외에, 동화에 사용되지 않은 독립적인 관측이나 분석-예측 사이클의 자체 분석장을 기준값으로 사용하기도 하는데, 전자의 경우, 극 지역에서는 관측자료의 수가 많지 않다는 문제가 있고 후자의 경우, 예측 초기에는 자체 분석장과 예보장 사이에 상관관계가 존재하는 문제가 있다. 본 연구에서는 가장 정확한 것으로 알려진 ECMWF ERA5 재분석자료를 이용하여, 예측결과를 검증한 후, 다른 재분석자료인 NCEP FNL (Final analysis) 자료, 자

체 분석장, 쇠빙선 아라온호에서 획득한 라디오존데 및 선박 관측을 이용하여 검증 결과를 확인하였다.

그림 22-26은 온도, 습도, 지위고도, 동서 방향의 바람, 남북 방향의 바람에 대한, 예측오차의 증가 혹은 감소 정도를 고도와 예보선행시간의 함수로 나타낸 것이다. 예측오차의 증가 혹은 감소는, 각각의 실험 (NoGPS, GEOOPT, SPIRE 실험)과 CTL 실험 RMSE (Root Mean Square Error)의 차이를 CTL 실험의 RMSE로 나누어 나타낸다 (dRMSE로 명명). 이 때, dRMSE 값이 양수이면, CTL 실험에 비해 예측오차가 감소한 것을, 그리고 dRMSE 값이 음수이면 예측오차가 증가한 것을 나타내며, 90% 유의수준에서 통계적으로 유의한 경우 노란색 점으로 표시하였다.

온도 변수는 GPS RO 관측자료의 동화에 의해 가장 큰 영향을 받는다. NoGPS 실험에서는 대기의 거의 모든 층에서, 약 120시간 예측까지 예측오차가 CTL 실험에 비해 증가하는 모습을 보인다. 특히, 500 hPa 이상의 고도에서는 이러한 예측오차의 증가가 48시간 예측까지 통계적으로 유의하다. 즉, NoGPS 실험에서는 GPS RO 관측자료가 동화되지 않아 분석장 온도 변수의 오차가 증가하고, 이 오차가 약 120시간 예측까지도 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 반면 GEOOPT 실험에서는 큐브위성으로부터 획득한 GPS RO 관측자료를 추가로 동화하여, 대기 거의 모든 층에서 분석장 온도 변수의 오차가 감소하고 이러한 개선이 약 24시간 예측까지 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 수증기 변수도 GPS RO 관측자료 동화의 영향을 크게 받을 수 있는 변수이나, 북극 지역에 존재하는 수증기의 양이 많지 않아 (특히, GPS RO 관측 오차가 작은 대기 중층 이상의 고도에서는) 온도 변수만큼 차이가 뚜렷하게 나타나지는 않는다. NoGPS 실험에서는 CTL 실험에 비해 예측 초반에 오차가 증가하고, GEOOPT 실험에서는 CTL 실험에 비해 분석장의 오차가 미미하게 줄어든다. 지위고도는 온도와 수증기의 변화에 비해, 그 효과가 비교적 바로 나타나는 변수이다. NoGPS 실험에서는 온도 변수와 유사하게, CTL 실험 대비, 예측오차가 약 96시간 예측시간까지 증가하는 모습을 보인다. 다만 9일 이후의 예측에서, CTL 실험에 비해 지위고도 예측오차가 감소하는데, 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다. 반면 GEOOPT 실험에서는 약 36시간 예측까지 400 hPa 이상의 고도에서 지위고도 오차의 감소가 나타나나, 통계적으로 유의하지 않고, 이후에는 CTL 실험 대비 예측오차가 증가, 감소, 증가하는 경향이 교차적으로 나타난다. 마지막으로 동서 방향의 바람과 남북 방향의 바람은, GPS RO 관측자료 동화의 효과가 자료동화 과정에서 직접적 (배경오차공분산에 의한 증분 제외)으로 나타나지는 않으나, 예측이 진행되면서 자료동화의 효과가 전파되는 변수라 할 수 있다. 이러한 특성으로 인해, 지위고도 예측오차 변동 패턴과 유사하나, 약 24시간의 시간 지연을 갖고 나타나는 모습을 보인다.

### Forecast Verification using ERA5 (Var:T)

### Forecast Verification using ERA5 (Var:Q)

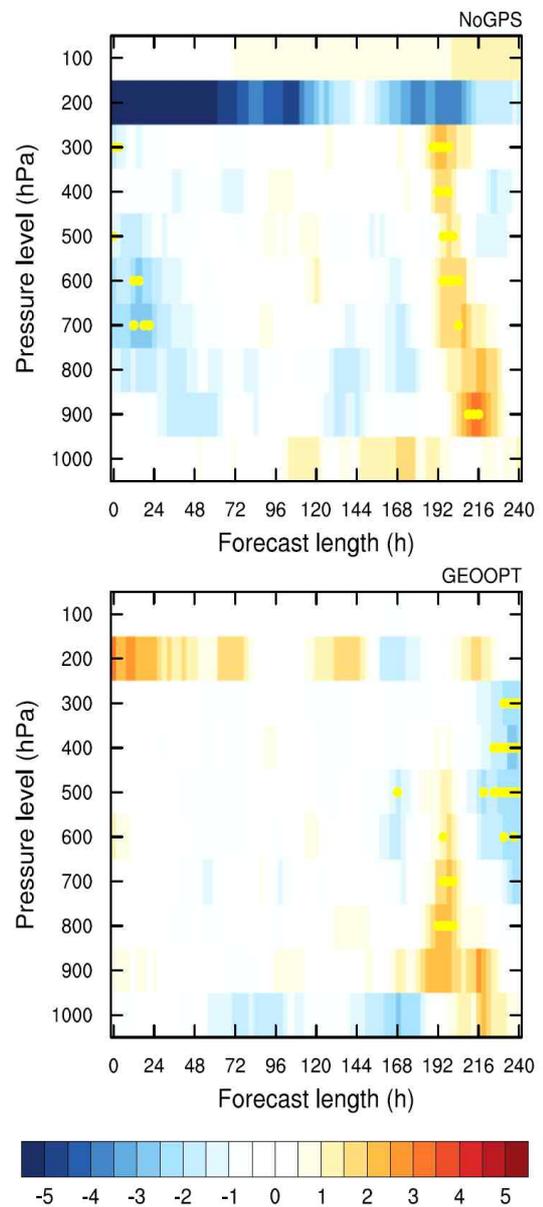
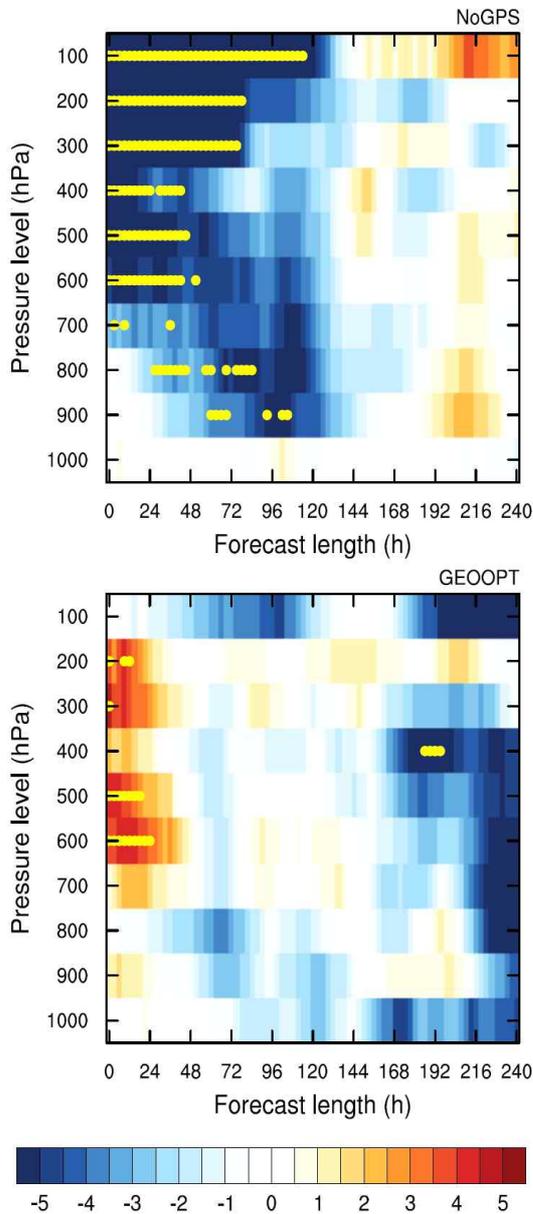


그림 22. ECMWF ERA5 재분석자료를 기준으로 계산한 온도 변수 근제곱평균오차의 CTL 실험 대비, 결과.

NoGPS 실험과 GEOOPT 실험의 차이 백분율. 압력 고도와 예보선행시간의 함수로 나타냄. 양의 값은 CTL 실험 대비 예측오차가 감소한 것을, 음의 값은 예측오차가 증가한 것을 나타냄. 90% 유의수준에서 통계적으로 유의한 차이는 노란색 점으로 표시.

그림 23. 그림 22와 같으나, 상대습도 변수에 대한

Forecast Verification using ERA5 (Var:Z)      Forecast Verification using ERA5 (Var:U)

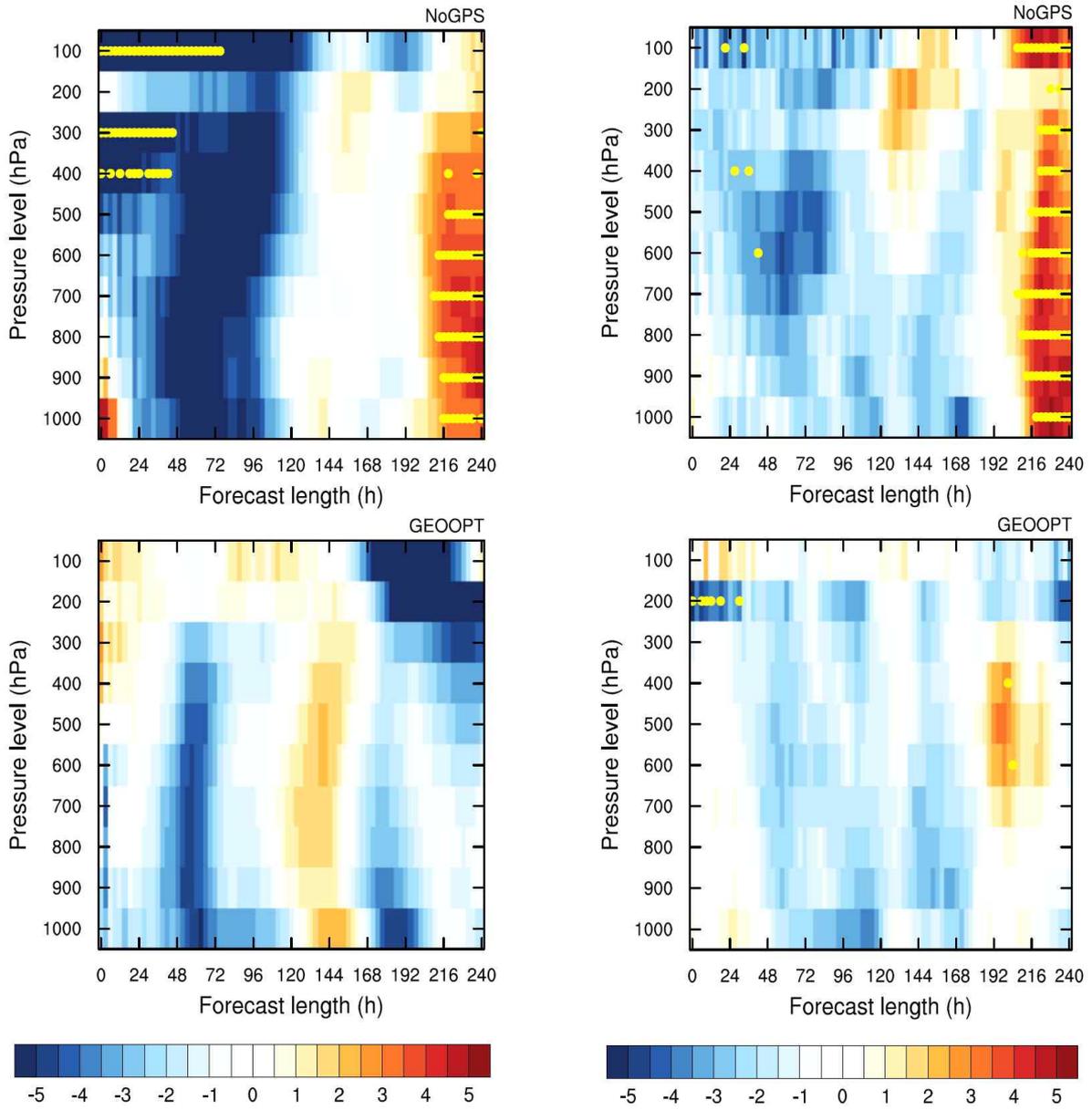


그림 24. 그림 22와 같으나, 지위고도 변수에 대한 결과.

그림 25. 그림 22와 같으나, 동서 방향 바람 변수에 대한 결과.

## Forecast Verification using ERA5 (Var:V)

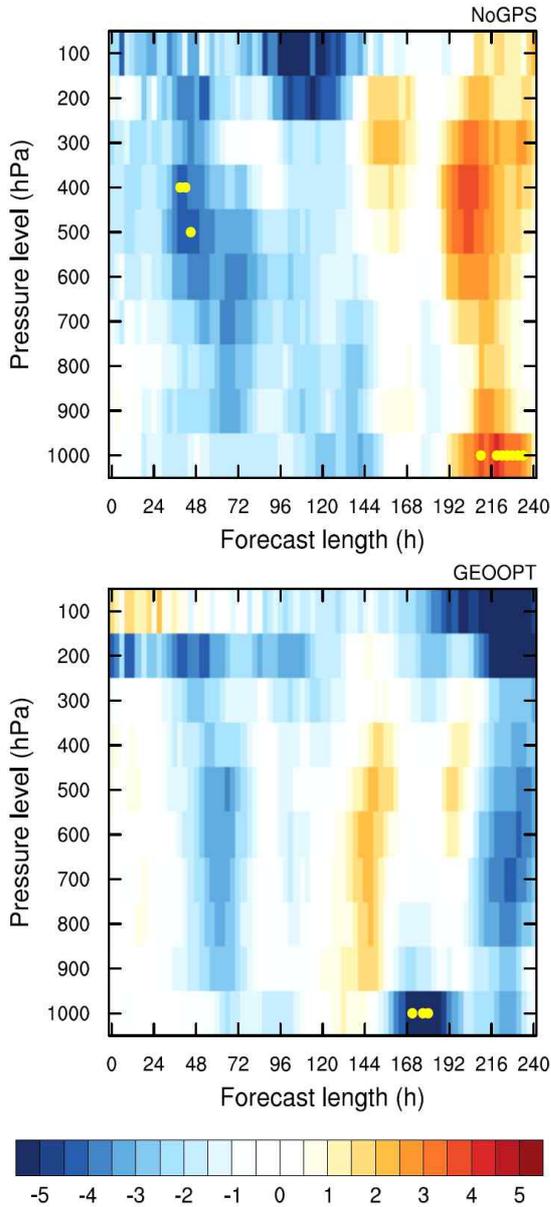


그림 26. 그림 22와 같으나, 남북 방향 바람 변수에 대한 결과.

SPIRE 실험은 관측자료를 사용할 수 있는 기간인, 2019년 8월 19일부터 25일까지의 기간에 대해서만 분석-예측의 자료동화 사이클 실험을 수행하였다 (그림 27-31). 온도 변수의 경우, 전체 기간 결과와 유사하게, CTL 실험과 비교하여 NoGPS 실험에서 예측오차의 증가, GEOOPT 실험에서 예측오차의 감소가 나타난다. SPIRE 실험에서는 GEOOPT 실험에서 나타난 예측오차의 감소가 더 뚜렷하게 나타나며, 특히 24시간 예측까지 CTL 실험 대비 예측오차의 감소가 대기 중상층에서 매우 뚜렷하게 나타난다. 수증기 변수의 경우, 전체 기간의 결과에서와 같이, 모든 실험에서 CTL 실험과의 차이가 크게 나타나지 않는다. 지위고도의 경우, NoGPS 실험과 GEOOPT 실험에서, CTL 실험 대비, 지위고도 오차가 증가하며 이러한 경향은 7일 이후 예측에서 더 두드러지게 나타난다. 반면 SPIRE 실험에서는, 500 hPa 이상의 고도에

서 약 96시간까지, 그리고 대기 거의 모든 층에서 9일 이후의 예측에서 예측오차가 감소하는 경향을 보여, 이에 대한 추가적인 분석이 요구된다. 동서 방향의 바람과 남북 방향의 바람의 경우, NoGPS, GEOOPT, 그리고 SPIRE 실험 모두에서 예보선행시간과 고도에 따라 예측오차의 변화가 불규칙적으로 크게 나타난다. 즉, Spire 큐브위성으로부터 획득한 GPS RO 관측자료를 추가로 동화하는 경우, 온도 변수 예측 개선이 보이나, WRF 모형의 (실험기간에 발달한) 북극 저기압에 대한 모의 성능이 좋지 않아 자료동화의 효과가 일관된 방향으로 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 추정된다.

### Forecast Verification using ERA5 (Var:T)

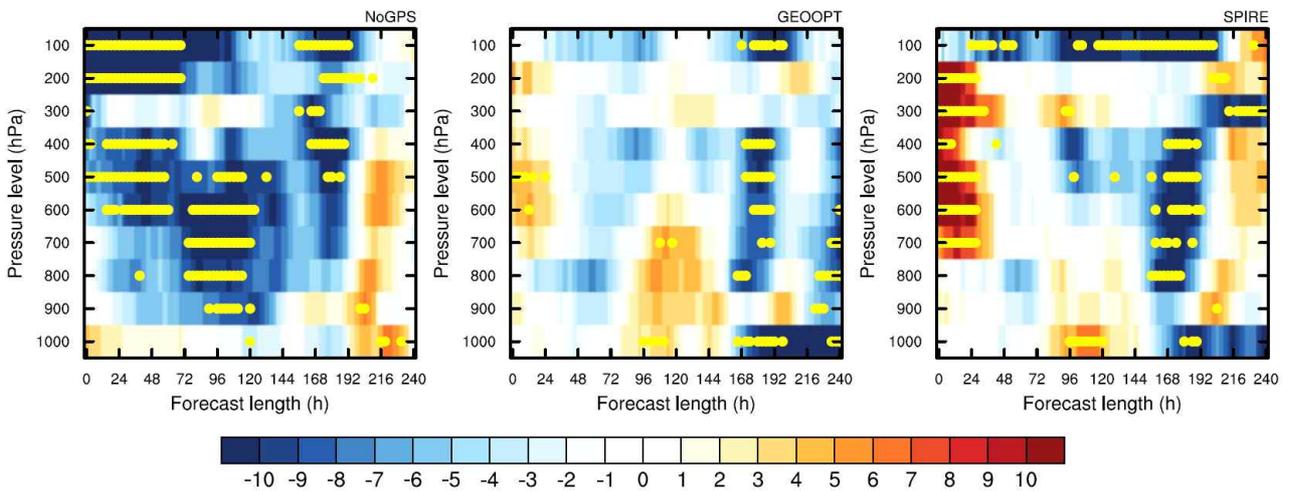


그림 27. 그림 22와 같으나, 전체 실험기간 (2019년 8월 5일 ~ 9월 18일)에 대한 평균이 아닌, Spire 큐브위성으로부터 획득한 GPS RO 관측자료를 사용할 수 있는 기간 (2019년 8월 19일 ~ 25일)에 대한 평균. NoGPS, GEOOPT, 그리고 SPIRE 실험에 대한 결과.

### Forecast Verification using ERA5 (Var:Q)

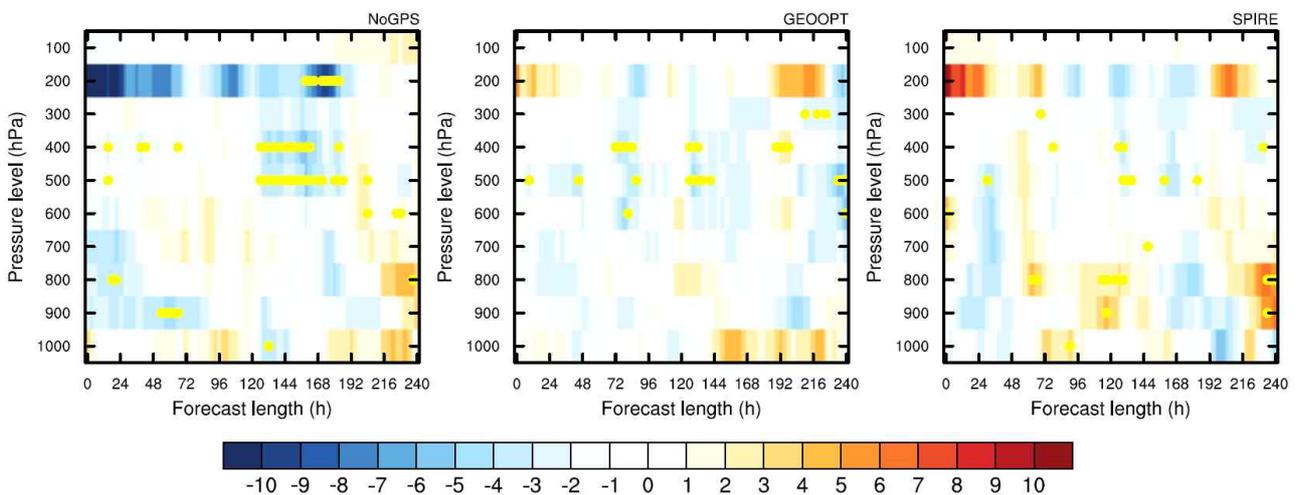


그림 28. 그림 27과 같으나, 상대습도 변수에 대한 결과.

### Forecast Verification using ERA5 (Var:Z)

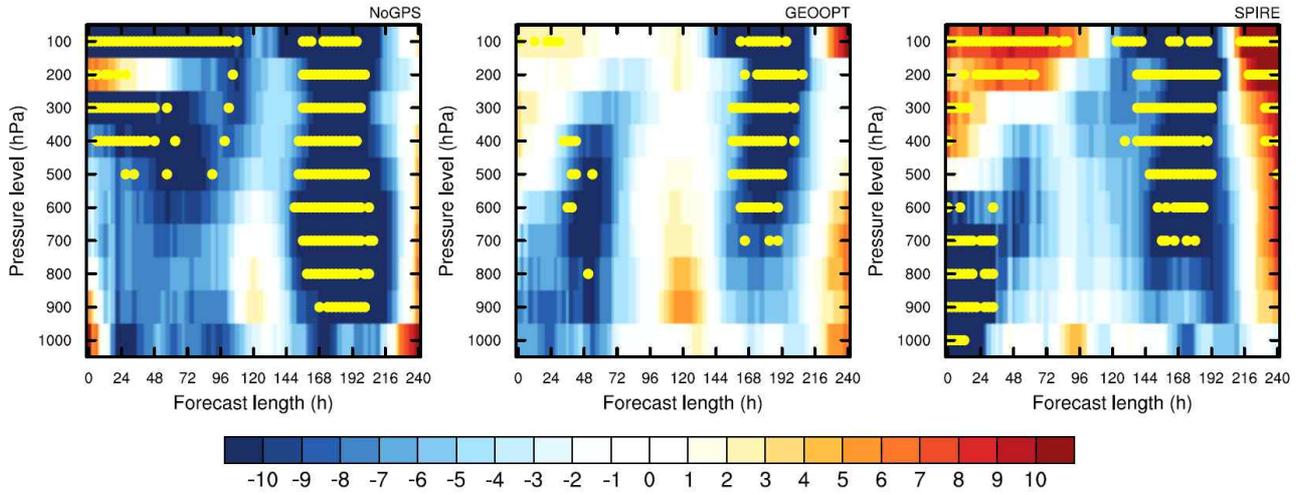


그림 29. 그림 27과 같으나, 지위고도 변수에 대한 결과.

### Forecast Verification using ERA5 (Var:U)

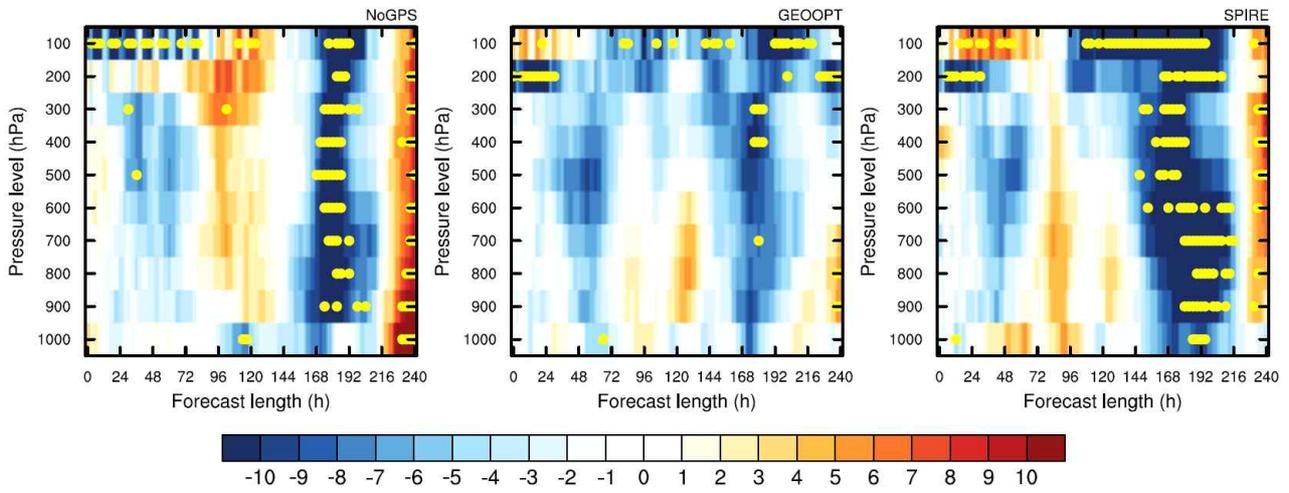


그림 30. 그림 27과 같으나, 동서 방향 바람 변수에 대한 결과.

## Forecast Verification using ERA5 (Var:V)

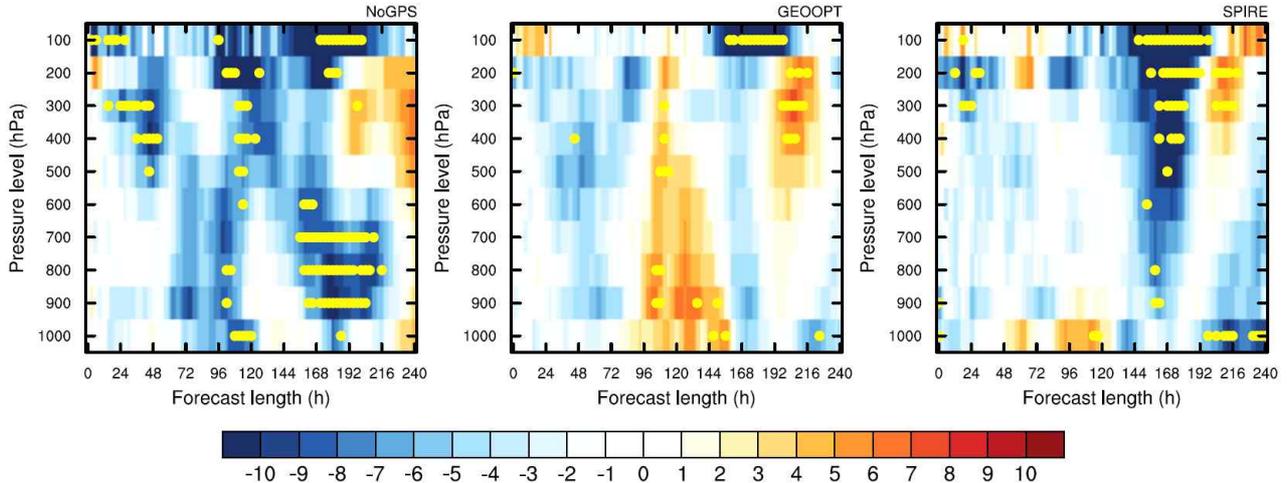
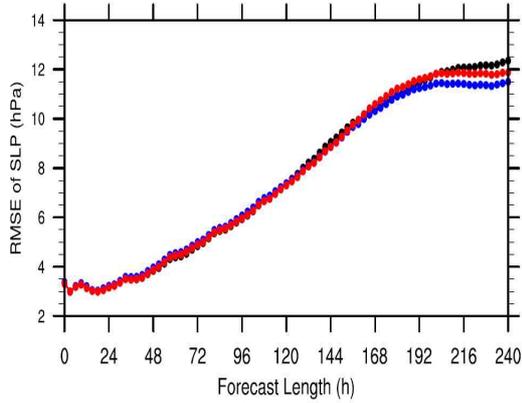


그림 31. 그림 27과 같으나, 남북 방향 바람 변수에 대한 결과.

GPS RO 관측은 주로 상부 대류권과 하부 성층권의 온도와 수증기에 대한 정보를 제공하는 것으로 알려져 있어, 2차원 변수에 대한 영향은 크지 않을 것으로 예상되나, 저기압이 발달 혹은 소멸하는 경우에는 영향을 줄 수 있다. ECMWF ERA5 재분석자료를 기준으로, CTL, NoGPS, GEOOPT 실험에 대한 예측오차 (근제곱평균오차)를 계산하고, 이를 예보선행시간의 함수로 나타내었다 (그림 32-36). 해면기압의 경우, 세 실험 간 예측오차의 차이가 크지 않지만, 약 7일 이후의 예측에서 NoGPS 실험과 GEOOPT 실험의 예측오차가 CTL 실험에 비해 작아지는 것을 볼 수 있다. Bootstrap 방법을 이용하여, 90% 유의수준에서 CTL 실험과 NoGPS 혹은 GEOOPT 실험 사이의 예측오차 차이에 대한 통계적 유의성을 검증해 보면, 9일 이후의 예측에서 NoGPS 실험의 예측오차가 감소하는 것 외에는 통계적으로 유의하지 않다. 2-m 온도의 경우, 온도의 일변화가 예측오차의 변화에도 반영되어 주기적인 패턴을 나타낸다. CTL 실험 대비 NoGPS 실험과 GEOOPT 실험에서의 2-m 온도 예측오차 변화는, 해면기압에 비해서도 작아 통계적으로 유의한 구간이 하나도 나타나지 않는다. 2-m 이슬점 온도의 경우도 2-m 온도와 비슷한 경향을 보이거나 (일변화 제외), 8일 이후의 예측에서 NoGPS 실험의 예측오차가 CTL, GEOOPT 실험에 비해 작아지는 것을 확인할 수 있다 (90% 유의수준에서 통계적으로 유의하지는 않음). 10 m 높이의 동서 방향의 바람과 남북 방향의 바람의 경우, 다른 변수들과 비슷하게, 세 실험 예측오차 사이의 차이가 크지 않으나, 동서 방향의 바람 예측오차는 NoGPS 실험에서, 그리고 남북 방향의 바람 예측오차는 NoGPS와 GEOOPT 실험에서, CTL 실험에 비해 8일 이후 예측오차가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Forecast Verification using ERA5



Forecast Verification using ERA5

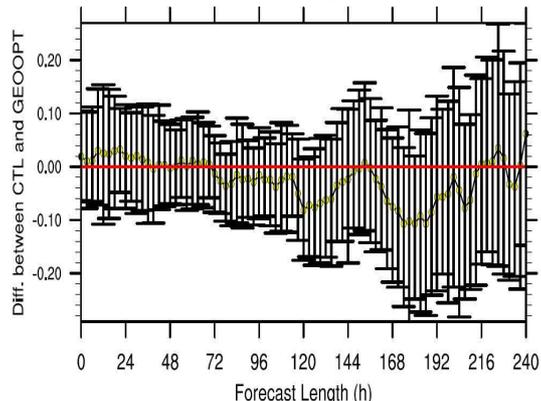
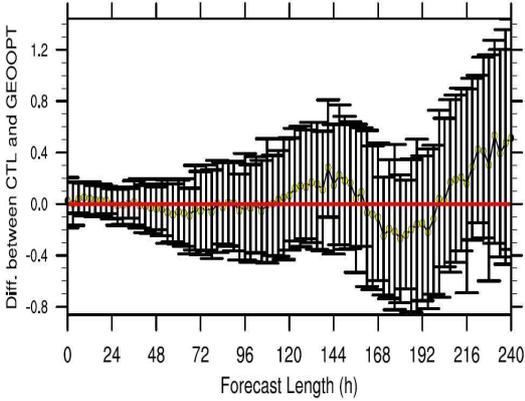
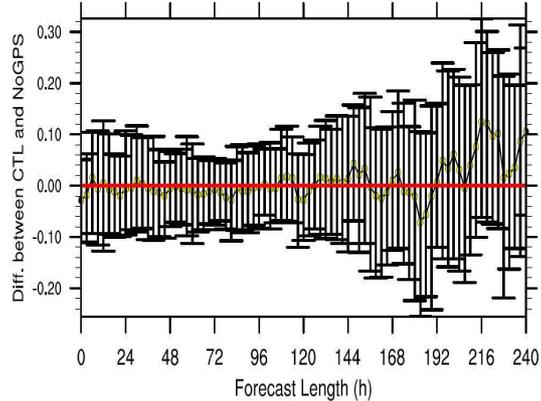
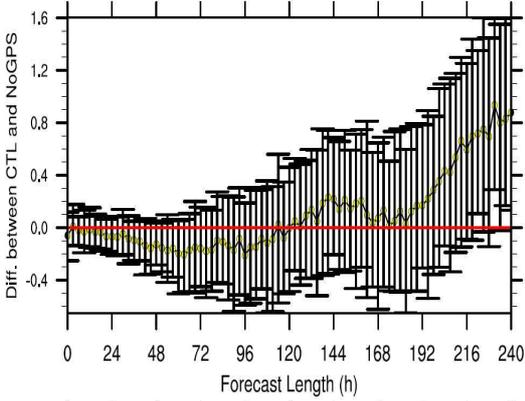
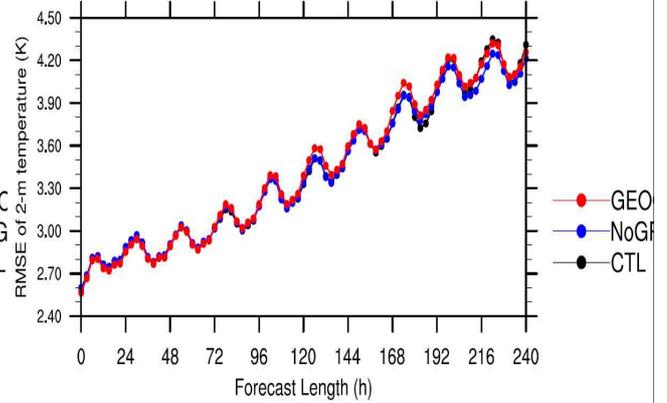
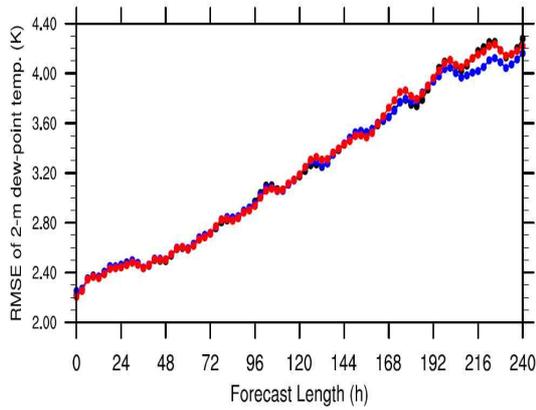


그림 32. ECMWF ERA5 재분석자료를 기준으로 계산한 해면기압의 근제곱평균오차. 예보선행시간의 결과.

함수로 표현하였으며, CTL (검은색), NoGPS (파란색), GEOOPT (빨간색) 실험의 결과를 함께 나타냄. CTL 실험과 NoGPS 실험의 예측오차 차이, CTL 실험과 GEOOPT 실험의 예측오차 차이를 bootstrap 방법으로 계산한 불확실성과 함께 나타냄.

그림 33. 그림 32와 같으나, 2-m 온도 변수에 대한

Forecast Verification using ERA5



Forecast Verification using ERA5

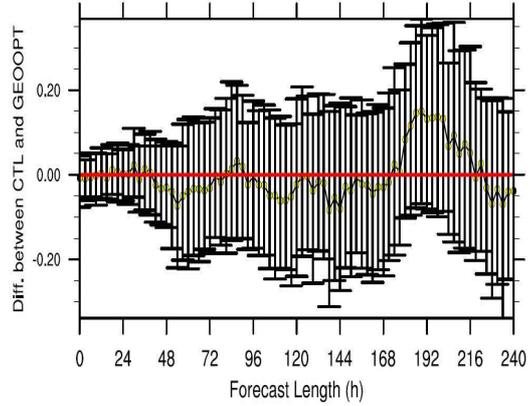
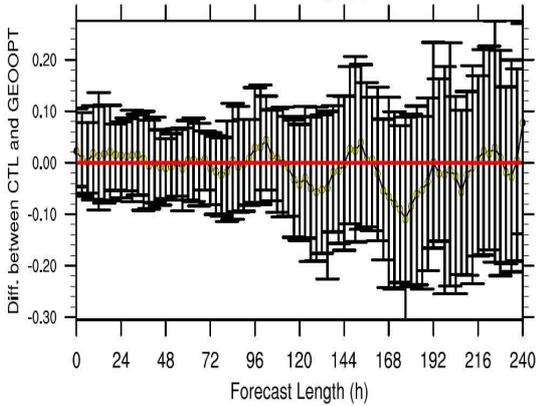
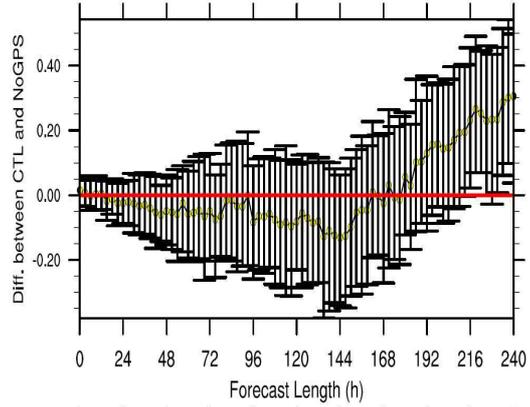
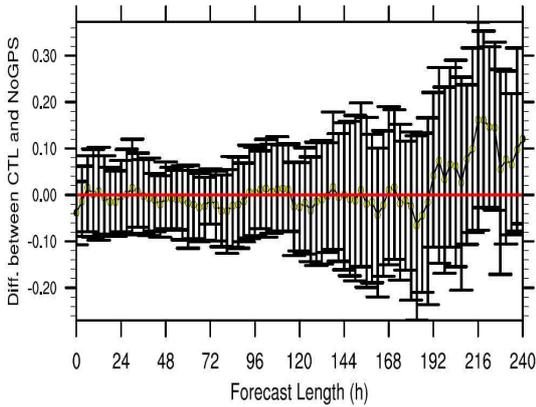
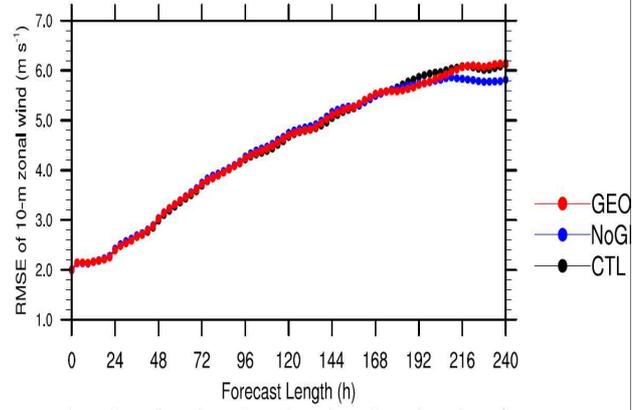


그림 34. 그림 32와 같으나, 2-m 이슬점 온도 변수에 대한 결과.

그림 35. 그림 32와 같으나, 10-m 동서 방향 바람 변수에 대한 결과.

### Forecast Verification using ERA5

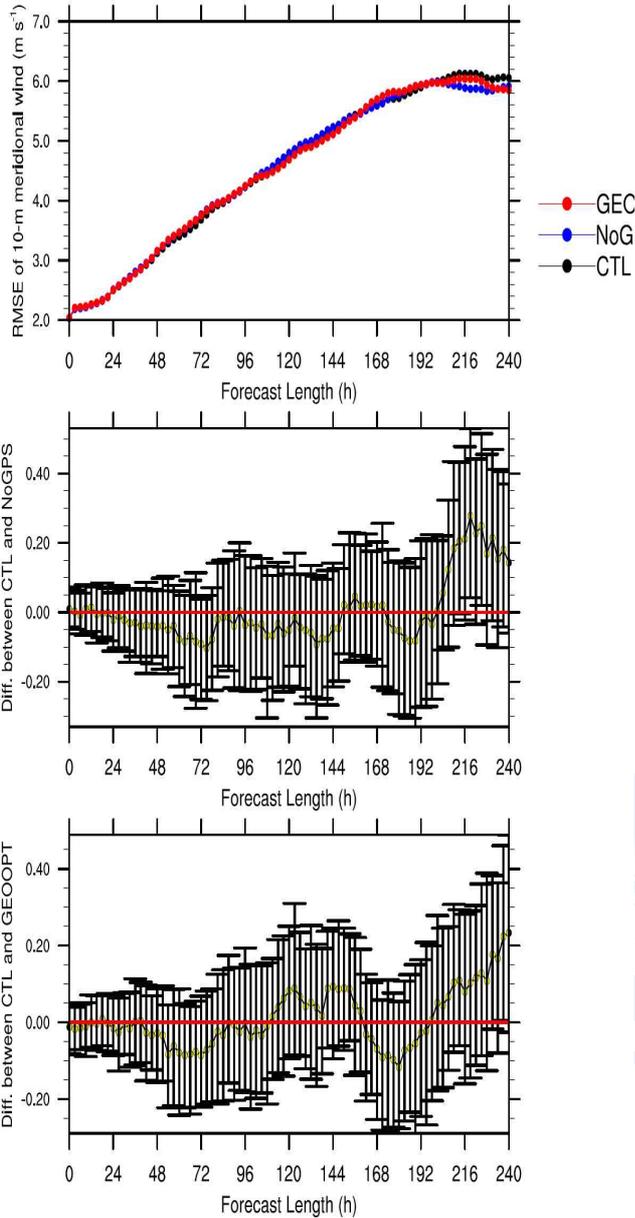


그림 36. 그림 32와 같으나, 10-m 남북 방향 바람 변수에 대한 결과.

앞에서, GPS RO 관측자료의 동화 효과가 예상보다 길게 유지되지 않는 이유로, WRF 모형 내 북극 저기압의 모의에 문제가 있어서라는 가정 (hypothesis)을 제시한 바 있다. 이러한 가정을 확인하기 위하여, 전체 실험 기간 가운데 저기압이 발달했던 기간과 고기압이 발달했던 기간을 선택하여 NoGPS, GEOOPT 실험의 예측오차를 CTL 실험의 예측오차와 비교하였다 (그림 37-42). 북극 저기압이 발달했던 기간에 대해서, 그림 22-26과 같은 분석을 수행하면, 그림 37-39와 같다. 온도 변수의 경우, NoGPS 실험에서는 분석장의 오차 증가로 약 72시간까지 예측오차가 증가하나, 오히려 예측시간이 길어지면 (약 8일 이후) CTL 실험에 비해 예측오차가 감소하는 모습을 보인다. 반대로 GEOOPT 실험에서는 예측 초반에는 예측오차가 감소하나, 약 6일 이후 예측오차는 CTL 실험에 비해 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경

향은 지위고도 예측오차에서 더욱 두드러지게 나타난다. NoGPS 실험의 예측오차는 약 7일 이후부터, 대기 거의 모든 고도에서 CTL 실험에 비해 감소하는 모습을 보이며, 이는 90% 유의 수준에서 통계적으로 유의하다. 반면 GEOOPT 실험의 예측오차는 약 7일 이후부터 CTL 실험에 비해 증가하며, 400 hPa 이상의 고도에서는 이러한 증가가 통계적으로 유의하다. 남북 방향의 바람의 경우, 온도나 지위고도 예측오차에 비해 약 1일 정도 늦게 변화가 나타나나, 전반적인 변화 양상은 두 변수와 유사하다. 즉, 저기압이 발달하는 기간에 대해서는, GPS RO 관측자료의 동화가 (예상과 같이) 초기 예측오차의 감소를 야기하나, 예측시간이 길어지면 오히려 예측오차를 증가시키는 역할을 한다. WRF 모형 최하층에 지속적인 음의 온도 편차 (cold bias)가 존재하여 대기로의 현열속 (sensible heat flux)이나 잠열속 (latent heat flux)이 과다모의되고, 이러한 계통적 오차는 저기압의 약화를 억제하는 방향으로 작용을 한다. GEOOPT (NoGPS) 실험에서는, CTL 실험에 비해 대기 상층의 온도 오차가 줄어들고 (증가하고), 이러한 온도의 연직구조 변화는 대기 상층 잠재와도 (potential vorticity)의 변화를 가져오는데, GEOOPT (NoGPS) 실험에서 저기압 발달에 유리 (불리)한 방향으로 잠재와도가 변화되어, 계통적 오차를 강화 (상쇄)하는 방향으로 작용하게 된다. 즉, WRF 모형이 갖고 있는 대기 상층과 최하층의 온도 편차 가운데, GEOOPT 실험에서, 상층의 오차만을 개선함으로써 (실제에 가깝게 온도가 변화되었으나) 시간이 지나면서 저기압이 실제보다 강하게 유지되는 결과를 가져온다고 할 수 있다.

반대로 북극해에서 고기압이 발달했던 기간에 대해서 같은 분석을 수행하면, 그림 40-42의 결과를 얻는다. GEOOPT 실험에서, GPS RO 관측자료의 동화에 의해 개선된 분석장에 의해, 온도 예측오차가 대기 거의 모든 고도에서 CTL 실험에 비해 감소하는 모습을 보인다. 반면 NoGPS 실험에서는 약 72시간까지 온도 예측오차가 CTL 실험에 비해 증가하는 모습을 나타낸다. 지위고도의 경우, NoGPS 실험에서 예측시작부터 24시간까지, 그리고 7일 이후, 예측오차가 통계적으로 유의 (90% 유의수준)하게 CTL 실험에 비해 증가하는 모습을 보인다. 반면 GEOOPT 실험에서는 거의 모든 예보선행시간에 대해, CTL 실험 대비 예측오차가 감소하며, 8일 이후의 예측에 대해서는 이러한 개선이 90% 유의수준에서 통계적으로 유의하다. 남북 방향의 바람의 경우, 온도나 지위고도 변수만큼 뚜렷하지는 않지만 CTL 실험에 비해, NoGPS 실험에서 예측오차가 증가하고 GEOOPT 실험에서 예측오차가 감소하는 모습을 나타낸다. 이러한 경향은 특히 5일에서 7일 예보선행시간에서 뚜렷하게 나타난다. 고기압이 발달할 때는 대기로의 난류속의 영향을 받지 않으므로, GPS RO 관측자료 동화에 의해 개선된 온도 (그리고 수증기) 연직구조가 예측시간이 증가하더라도 지속적으로 예측오차 감소에 기여한다고 할 수 있다.

Forecast Verification using ERA5 (Var:T)      Forecast Verification using ERA5 (Var:Z)

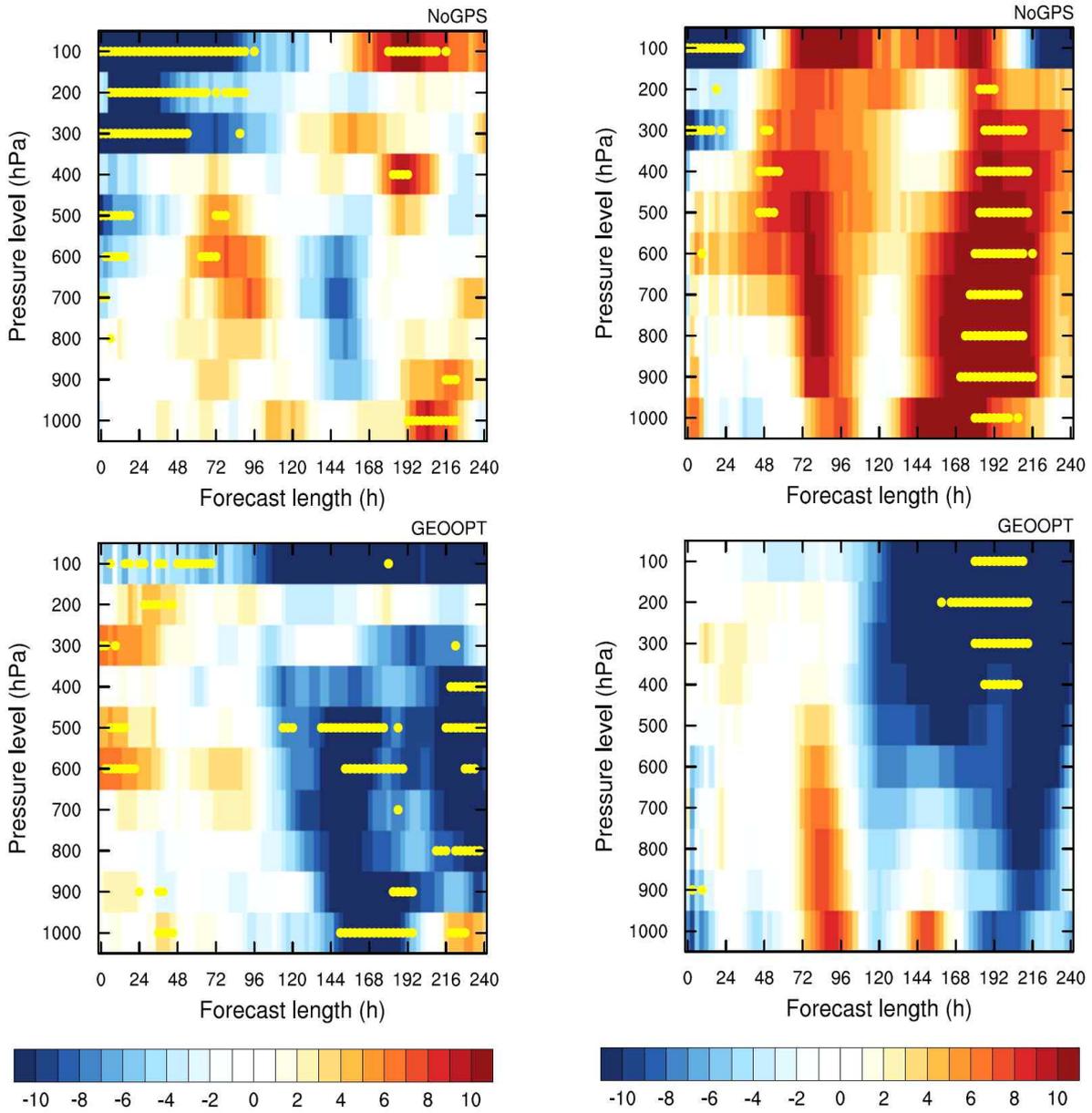


그림 37. 그림 22와 같으나, 전체 실험기간이 아닌 저기압 발달 기간에 대해서만 평균한 결과. 온도 변결과 수.

그림 38. 그림 37과 같으나, 지위고도 변수에 대한

Forecast Verification using ERA5 (Var:V)      Forecast Verification using ERA5 (Var:T)

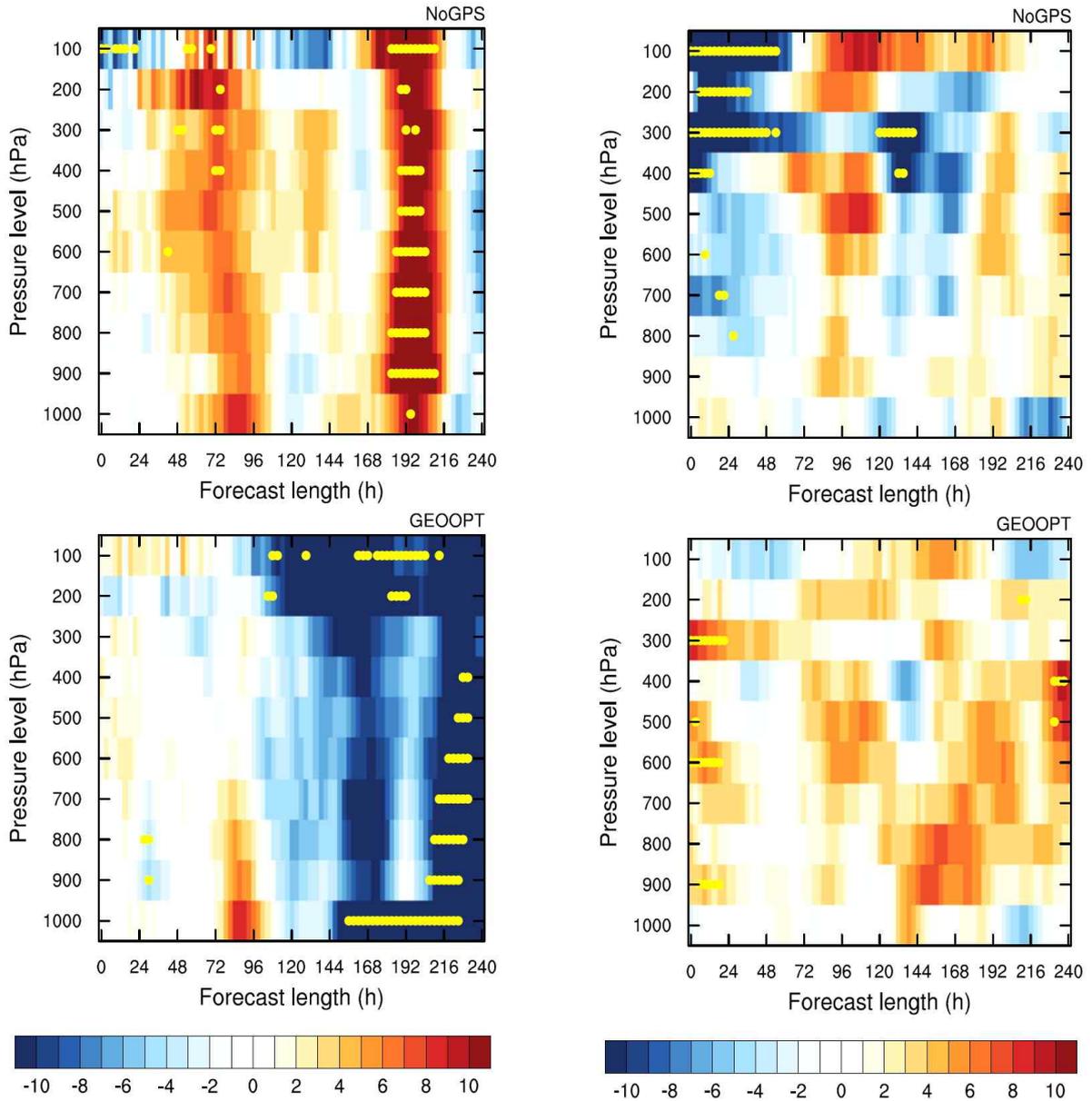


그림 39. 그림 37과 같으나, 남북 방향 바람 변수에 대한 결과.      그림 40. 그림 22와 같으나, 고기압 기간에 대해서만 평균한 결과. 온도 변수.

Forecast Verification using ERA5 (Var:Z)      Forecast Verification using ERA5 (Var:V)

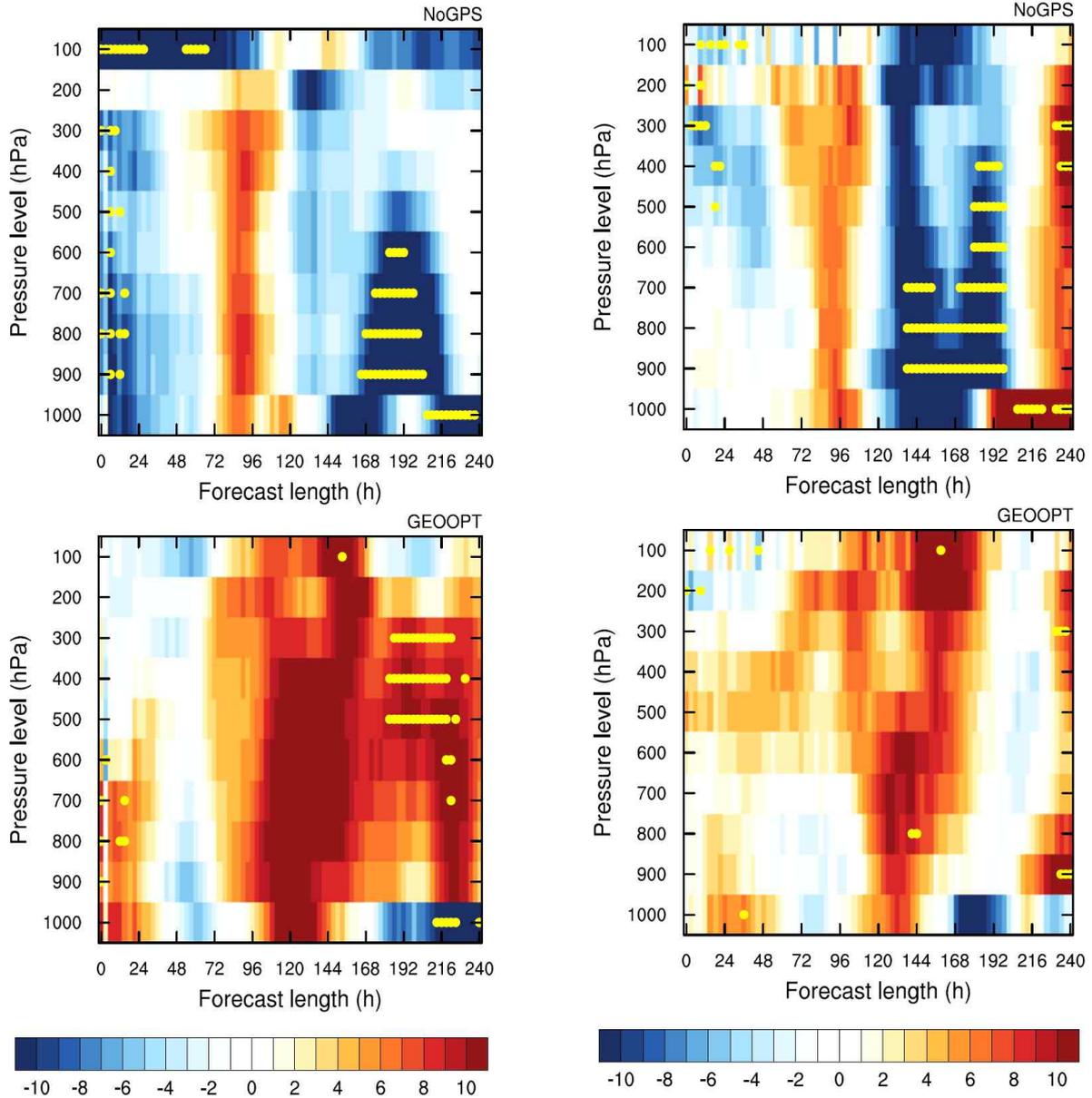


그림 41. 그림 40과 같으나, 지위고도 변수에 대한 결과.      그림 42. 그림 40과 같으나, 남북 방향 바람 변수에 대한 결과.

가장 정확하다고 알려진 ECMWF ERA5 재분석자료를 이용한 검증결과 외에, NCEP FNL 자료를 이용하여 비슷한 분석을 수행하였다. 이를 통해, 불확실성이 큰 북극 지역에서 두 개의 재분석자료를 이용한 검증결과가 어느 정도 일관성이 있는지 살펴보고자 한다. 그림 43-47은 온도, 습도, 지위고도, 동서 방향의 바람, 그리고 남북 방향의 바람에 대한, CTL 실험 대비 NoGPS 실험과 GEOOPT 실험의 근제곱평균오차 변화를 나타낸다. 압력 고도와 예보시행시간에 따른 변화를 나타내며, 양의 값은 CTL 실험에 비해 예보오차가 감소한 것을, 그리고 음의 값은 CTL 실험에 비해 예보오차가 증가한 것을 나타낸다. 90% 유의수준에서 통계적으로 유의한 차이는 노란색 점으로 표시하였다. ERA5 재분석자료를 이용한 검증은, WRF 모형의 아웃풋 간격인 3시간 간격으로 수행한 데 반해, 여기서는 FNL 자료의 시간 간격인 6시간에 맞

취 오차를 계산하였다.

온도 변수의 경우 (그림 43, 그림 22에 대응), NoGPS 실험의 오차는 최하층 (1000 hPa) 을 제외한 모든 고도에서 약 120시간 예측까지 CTL 실험에 비해 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 때, 예측오차의 차이는, 고도에 따라 차이가 있지만, 최대 96시간 예보선행시간까지 통계적으로 유의하다. 반면, GEOOPT 실험에서는 GPS RO 관측자료의 추가동화로 분석장의 품질이 향상되고, 이러한 변화가 (CTL 실험 대비) 예측오차 감소에 기여하나, 지속시간은 700 hPa 이상의 고도에서 약 48시간이다. 그림 22와 비교했을 때, 구체적인 패턴에는 차이가 있으나, 정성적으로 일관된 결과를 보여주고 있다.

수증기 변수의 경우 (그림 44, 그림 23에 대응), 200 hPa 고도에서, NoGPS 실험에서는 CTL 실험 대비 예측오차의 증가가, 그리고 GEOOPT 실험에서는 예측오차의 감소가 특징적으로 나타난다. 그러나, 다른 고도에서의 예측오차 변화는 온도 변수에 비해 뚜렷하지 않다. 지위 고도의 경우 (그림 45, 그림 24에 대응), NoGPS 실험에서 온도 예측오차의 증가와 연관된 지위 고도 오차의 증가가 약 120시간 예보선행시간까지 관찰되나, 통계적으로 유의하지 않고, 9일 이후의 예측오차가 CTL 실험에 비해 오히려 감소하는 모습을 보인다. GEOOPT 실험에서는, 120~144 예보선행시간에서는 CTL 실험에 비해 (통계적으로 유의하지 않으나) 예측오차가 감소하나, 그보다 예보선행시간이 짧거나 긴 경우에는 예측오차가 증가하는 경향을 보인다. 동서 방향의 바람 (그림 46, 그림 25에 대응)과 남북 방향의 바람 (그림 47, 그림 26에 대응)에서는, NoGPS와 GEOOPT 실험 모두, 예측 초기에는 CTL 실험에 비해 예측오차가 증가하나, 약 8일 이후부터는 CTL 실험에 비해 예측오차가 감소하는 모습을 보인다. 이러한 경향은 NoGPS 실험의 동서 방향의 바람에서 가장 뚜렷하게 나타난다. 정리하면, 서로 독립된 두 개의 재분석자료 (ECMWF ERA5와 NCEP FNL)를 이용한 검증결과는, 정성적으로 유사한 결과를 보이고 있어, 재분석자료를 이용한 검증에 어느 정도의 타당성을 부여한다.

Forecast Verification using FNL (Var:T)      Forecast Verification using FNL (Var:Q)

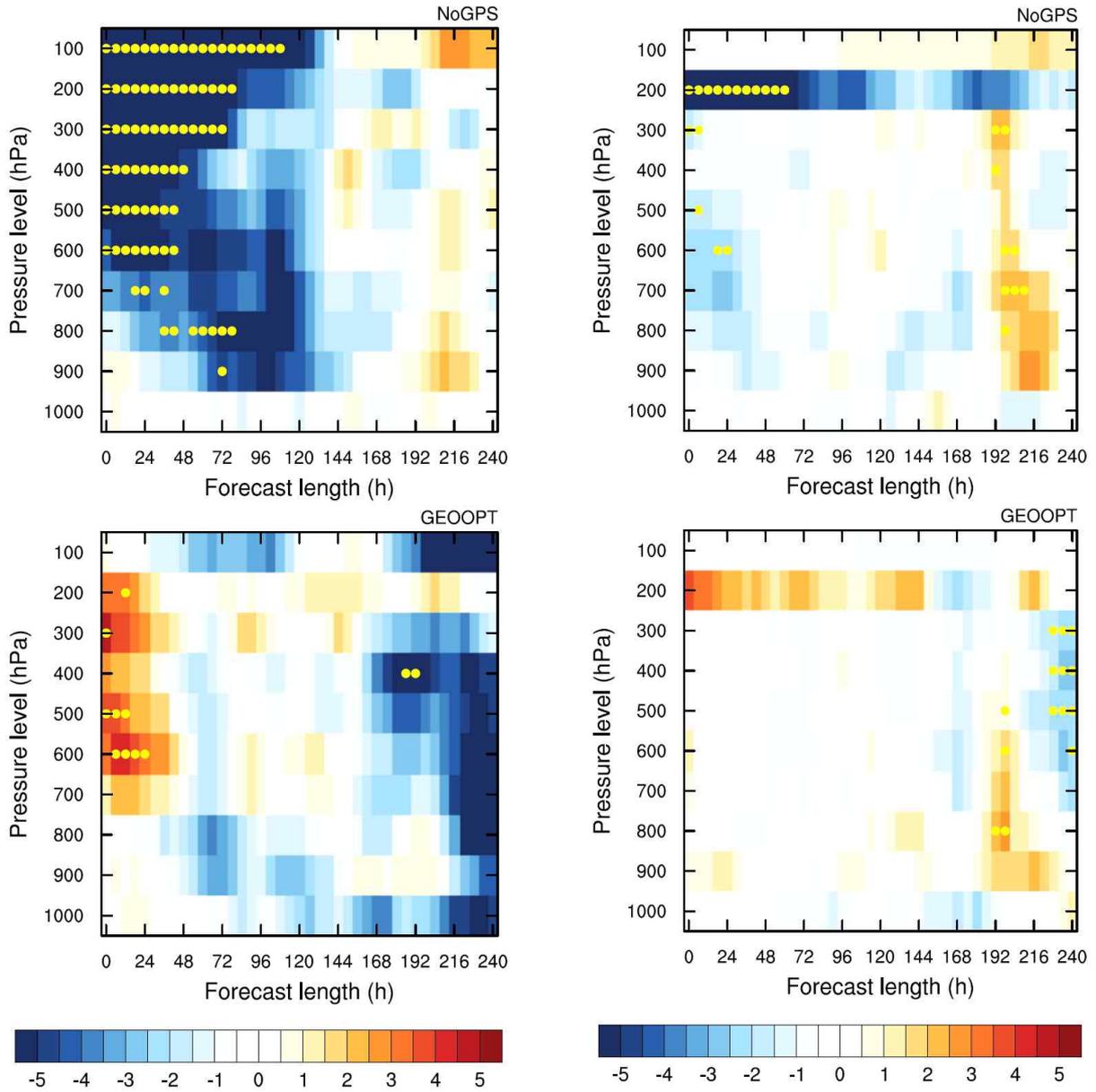


그림 43. NCEP FNL 재분석자료를 기준으로 계산한 그림 44. 그림 43과 같으나, 상대습도 변수에 대한 온도 변수 근제곱평균오차의 CTL 실험 대비, 결과.

NoGPS 실험과 GEOOPT 실험의 차이 백분율. 압력 고도와 예보선행시간의 함수로 나타냄. 양의 값은 CTL 실험 대비 예측오차가 감소한 것을, 음의 값은 예측오차가 증가한 것을 나타냄. 90% 유의수준에서 통계적으로 유의한 차이는 노란색 점으로 표시.

Forecast Verification using FNL (Var:Z)      Forecast Verification using FNL (Var:U)

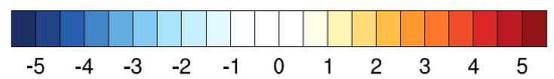
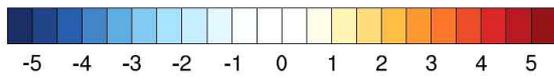
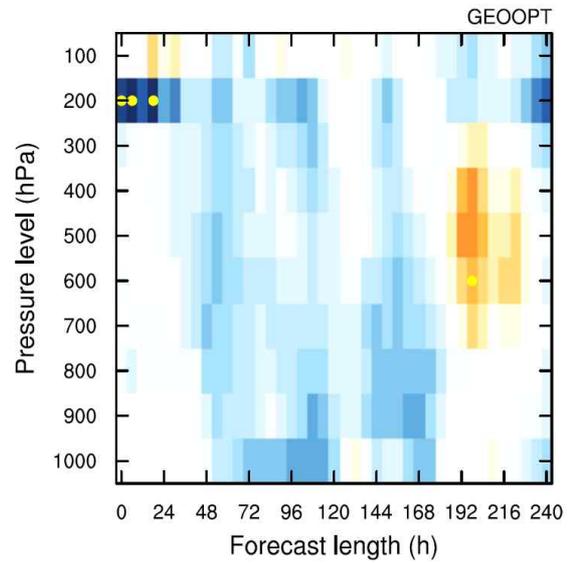
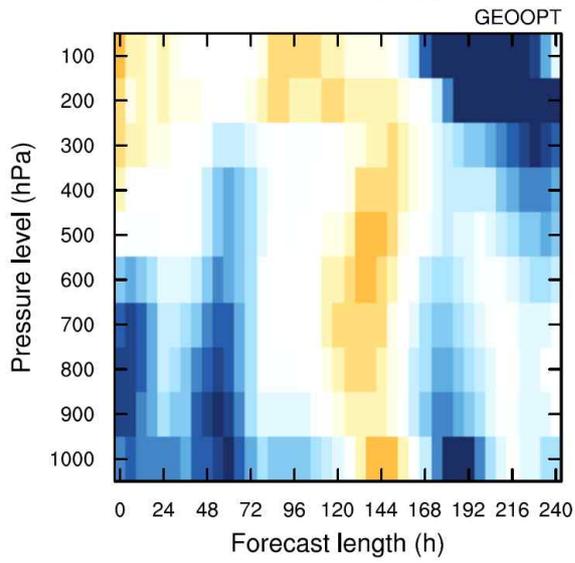
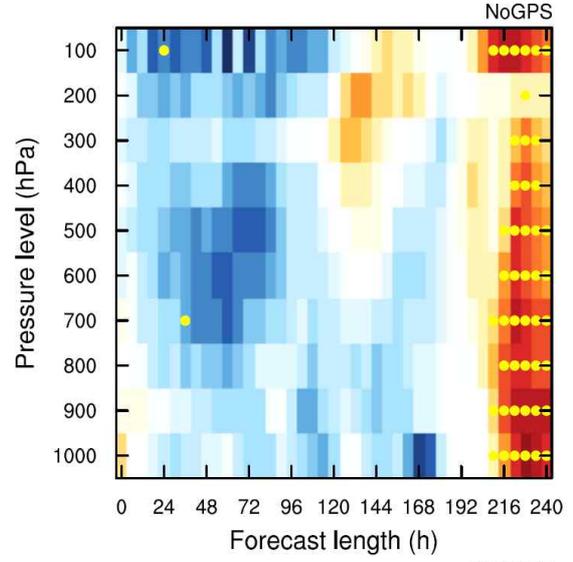
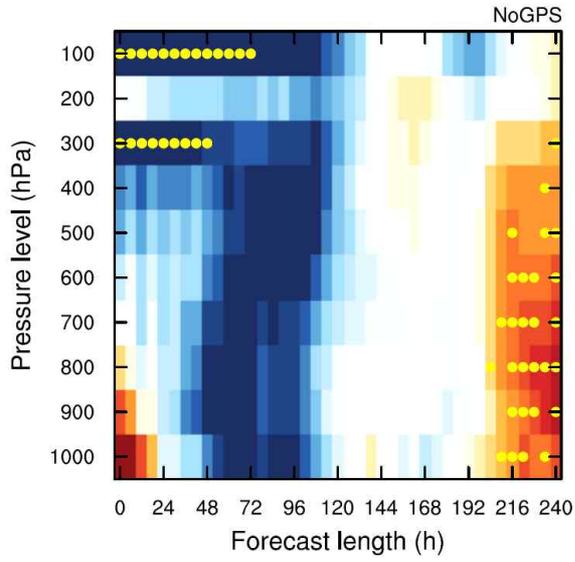


그림 45. 그림 43과 같으나, 지위고도 변수에 대한 결과.

그림 46. 그림 43과 같으나, 동서 방향 바람 변수에 대한 결과.

## Forecast Verification using FNL (Var:V)

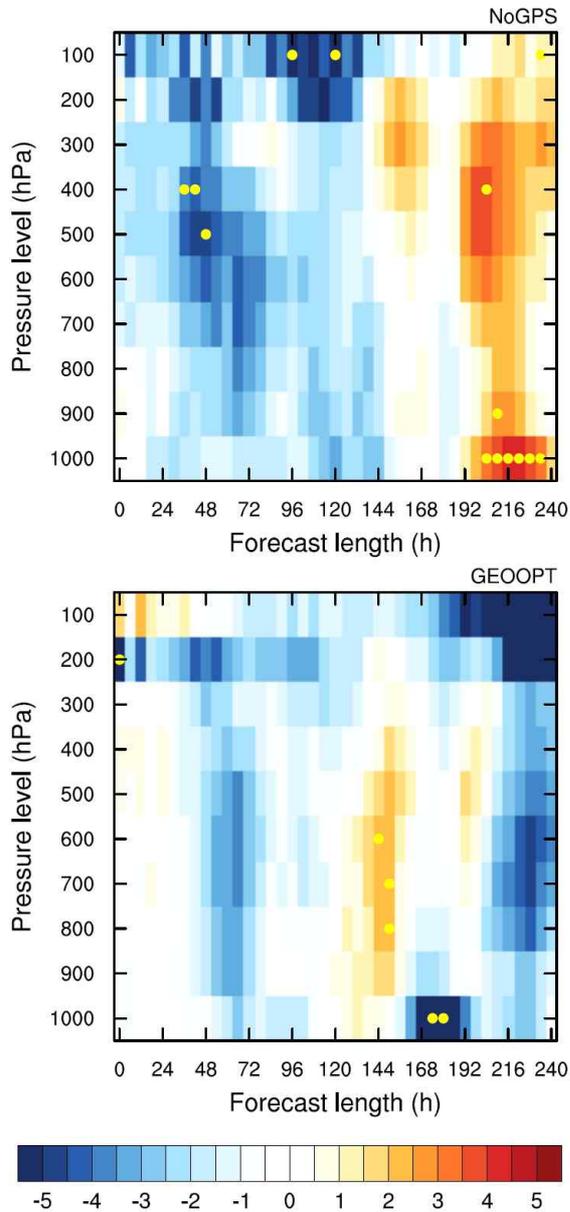


그림 47. 그림 43과 같으나, 남북 방향 바람 변수에 대한 결과.

ECMWF ERA5, NCEP FNL 재분석자료 모두, GeoOptics 큐브위성으로부터 획득한 GPS RO 관측자료는 동화되지 않았으므로, GEOOPT 실험의 자체 분석장을 기준으로, 각각의 실험 (CTL, NoGPS, GEOOPT)에 대한 분석을 진행하였다 (그림 48-52). 온도 변수의 경우 (그림 48), NoGPS 실험의 예측오차는 약 120시간 예보선행시간까지 CTL 실험에 비해 증가하며, 이는 ERA5, FNL 재분석자료를 이용한 검증결과와 일치한다. GEOOPT 실험의 예측오차는 예측 초기에 CTL 실험 대비 감소하는 모습을 나타내며, ERA5, FNL 재분석자료를 이용한 검증결과와 달리, 대기 전층에서 예측오차의 감소가 뚜렷하게 나타난다. 수증기 변수의 경우 (그림 49), 앞에서 제시한 ERA5나 FNL 자료를 이용한 검증결과와 달리, 비록 24시간 예측에 한정되지만, CTL 실험 대비, NoGPS 실험에서는 예측오차의 증가가, 그리고 GEOOPT 실험에서는

예측오차의 감소가 통계적으로 유의하게 나타난다. 또한 8일 이후의 예측에서, NoGPS 실험의 예측오차가 600 hPa 고도 아래에서 CTL 실험에 비해 감소하는 것을 확인할 수 있다. 지위고도 변수의 경우 (그림 50), NoGPS 실험에서는, 약 120시간 예보선행시간까지 (CTL 실험 대비) 예측오차가 증가하다가, 8일 이후에는 예측오차가 감소하며, 이러한 경향은 재분석자료를 이용한 검증결과와 일치한다. GEOOPT 실험에서는 예측초기에 국한되어 CTL 실험에 비해 오차가 감소하는 모습을 보이거나, 이후에는 (차이가 통계적으로 유의하지는 않지만) 예측오차가 증가하는 모습을 나타낸다. 동서 방향의 바람 (그림 51)과 남북 방향의 바람 (그림 52) 변수의 경우, 비슷한 양상을 보이는데, NoGPS 실험에서는 예측 초기에 CTL 실험 대비 예측오차가 증가하나, 약 8일 이후의 예측오차는 감소하는 모습을, GEOOPT 실험에서는 약 24시간 예측까지는 CTL 실험에 비해 오차가 감소하나, 이후에는 증가하는 모습을 보인다. 특징적으로, 동서 방향의 바람의 경우, 8일 이후의 예측에서 NoGPS 실험과 GEOOPT 실험 모두에서 CTL 실험에 비해 예측오차가 감소하는 경향을 보인다. 정리하면, GEOOPT 실험의 자체 분석장을 기준으로 예측오차를 계산하면, GeoOptics 큐브위성에서 획득한 GPS RO 관측자료의 동화효과가 부각되어, 예측초기 (약 24시간까지)에 NoGPS 실험의 예측오차 증가와 GEOOPT 실험의 예측오차 감소가 더 뚜렷하게 나타나나, 정성적인 특성은 ECMWF ERA5, NCEP FNL 재분석자료를 이용한 검증결과와 일관성 있게 나타난다.



Forecast Verification using own analysis (Var:T)      Forecast Verification using own analysis (Var:Q)

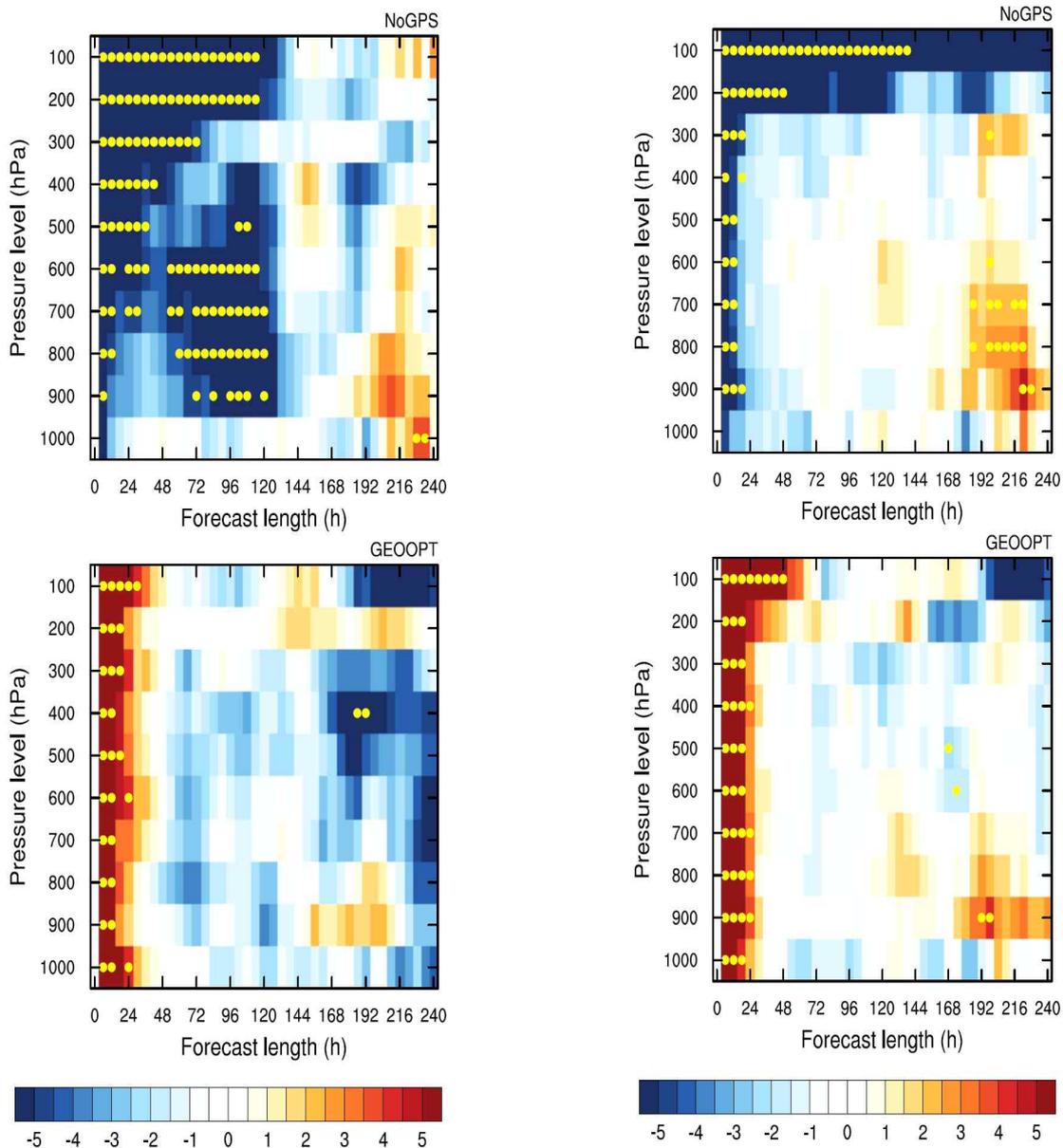


그림 48. 자체 분석장을 기준으로 계산한 온도 변수 그림 49. 그림 48과 같으나, 상대습도 변수에 대한 근제곱평균오차의 CTL 실험 대비, NoGPS 실험과 결과.

GEOOPT 실험의 차이 백분율. 압력 고도와 예보선행시간의 함수로 나타냄. 양의 값은 CTL 실험 대비 예측오차가 감소한 것을, 음의 값은 예측오차가 증가한 것을 나타냄. 90% 유의수준에서 통계적으로 유의한 차이는 노란색 점으로 표시.

Forecast Verification using own analysis (Var:Z)      Forecast Verification using own analysis (Var:U)

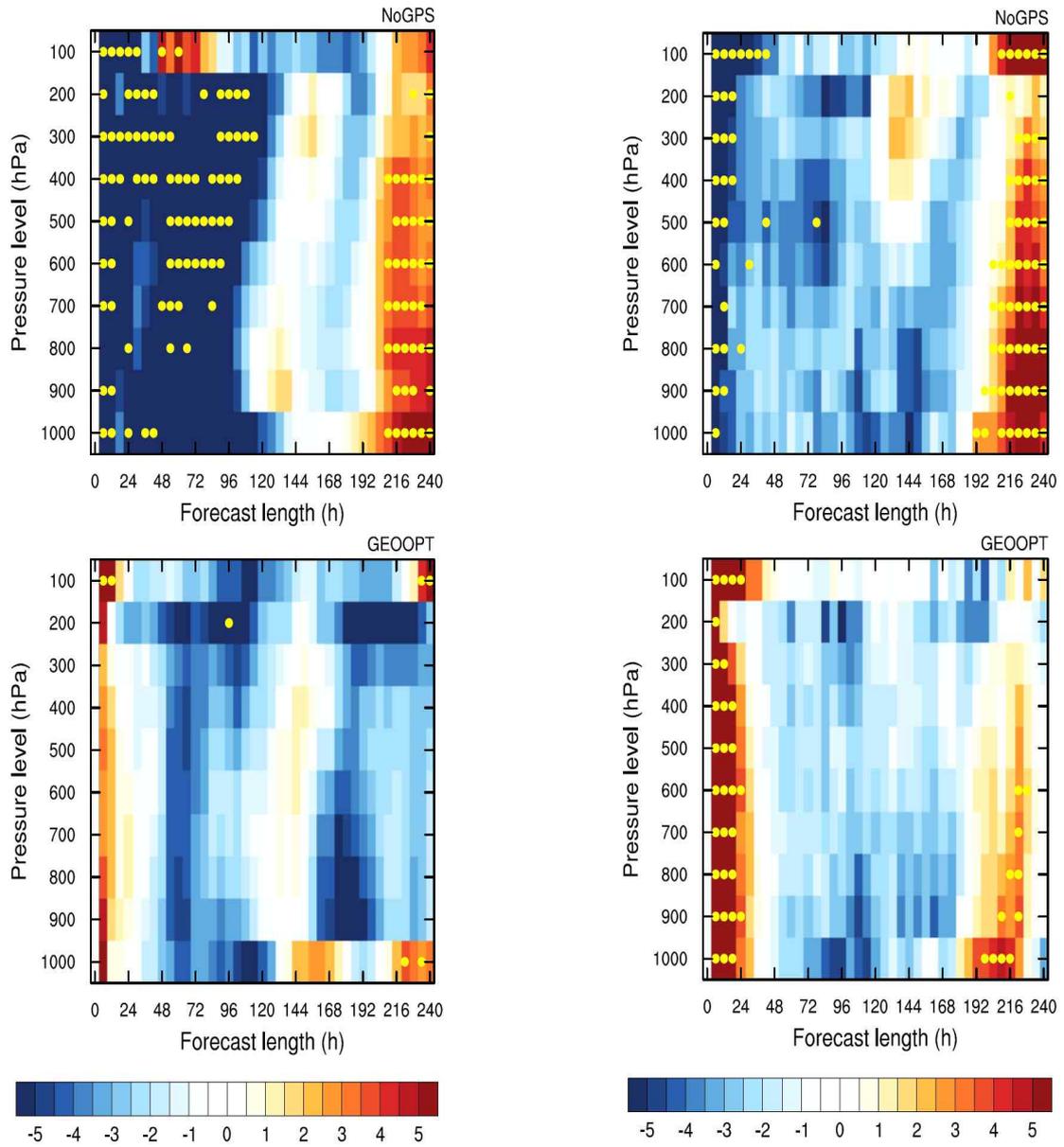


그림 50. 그림 48과 같으나, 지위고도 변수에 대한 결과.

그림 51. 그림 48과 같으나, 동서 방향 바람 변수에 대한 결과.

## Forecast Verification using own analysis (Var:V)

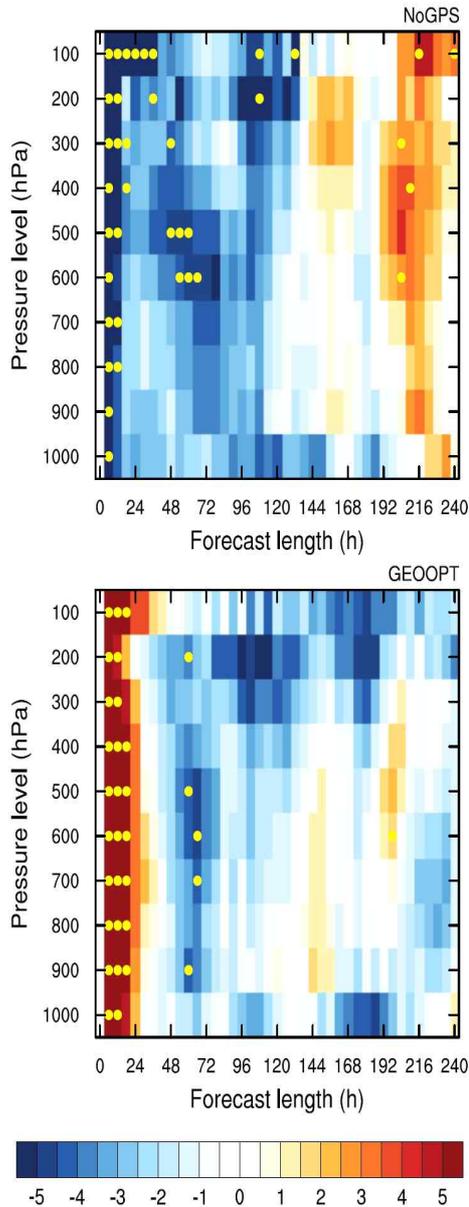
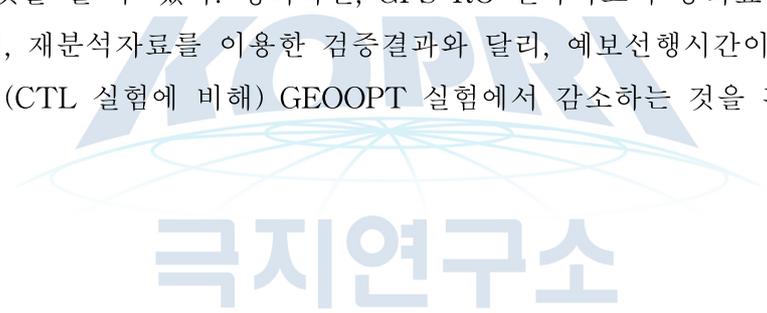


그림 52. 그림 48과 같으나, 남북 방향 바람 변수에 대한 결과.

분석-예측 자료동화 사이클링 실험 기간은, 2019년 쇄빙선 아라온호의 북극 항해 기간과 일치하여, 아라온호에서 획득한 라디오존데와 선박 AWS (Automatic Weather Station) 관측자료를 검증에 사용할 수 있다. 라디오존데 관측자료는 자료동화에 사용되었으나, 예측결과의 검증에 사용될 수 있고, 선박 AWS 관측은 자료동화에 사용되지 않은 독립된 (independent) 관측자료이다. 실제를 반영하는 관측자료를 검증에 이용한다는 장점이 있으나, 라디오존데 관측은 (아라온호를 따라 이동하는) 지점에서의 연직 프로파일을, 선박 AWS 관측은 지점에서의 값을 나타내는 한계가 있어 (즉, 검증 영역이 상당히 제한되는) GPS RO 관측자료 동화의 효과를 대표성을 갖고 나타내기에는 부족한 면이 있다. 그림 53-56은 온도, 수증기, 동서 방향의 바람, 그리고 남북 방향의 바람에 대한, 아라온호 라디오존데 관측 기준, 근제곱평균오차의 예

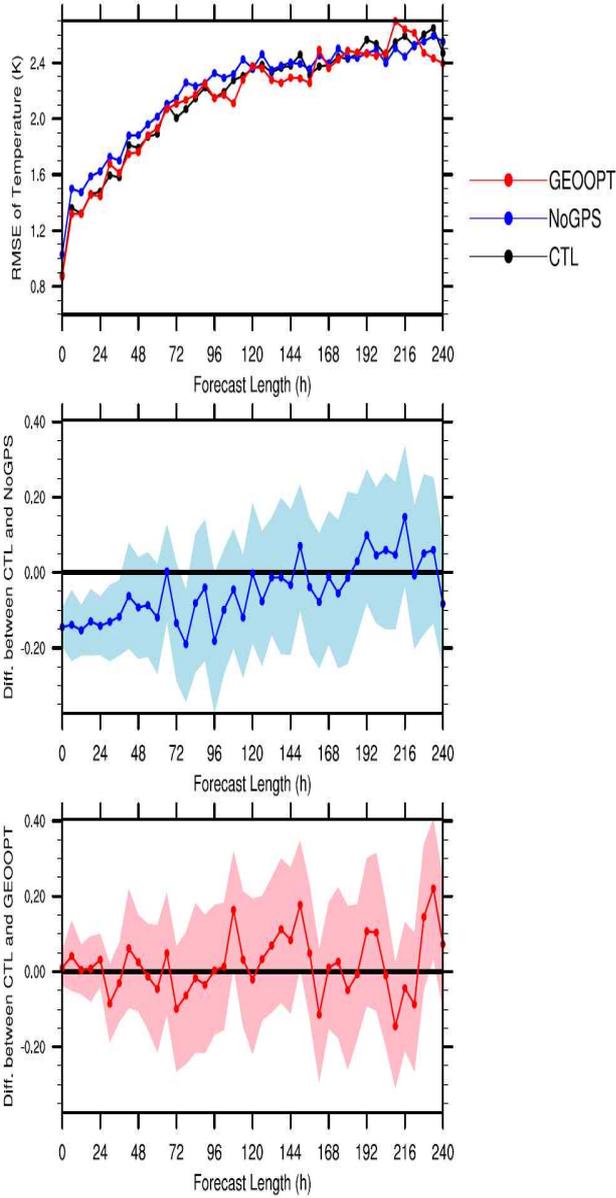
보선행시간에 따른 변화, CTL 실험과 NoGPS 실험의 차이, 그리고 CTL 실험과 GEOOPT 실험의 차이를 나타낸다. Bootstrap 방법을 이용한 resampling에서 얻은, 90% 유의수준에서의 불확실성을 함께 나타내, 통계적으로 유의한 차이를 표시하였다.

검증 영역이 제한되고, 모형의 예측결과가 한 지점에서의 프로파일을 정확히 예측하기는 어렵기에, 통계적으로 유의한 차이를 관찰하기는 어렵지만, 재분석자료 혹은 자체 분석장을 이용한 검증결과와 비교하여 어느 정도의 일관성이 있는지 알아보는 것은 중요하다. 온도 변수의 경우, 전반적으로, NoGPS 실험의 예측오차는 CTL 실험에 비해 증가하고, GEOOPT 실험의 예측오차는 CTL 실험에 비해 감소하는 경향을 보인다. 특히 NoGPS 실험의 예측오차 증가는, 약 36시간 예보선행시간까지 90% 유의수준에서 통계적으로 유의미하게 나타나, GPS RO 관측자료의 동화가 온도 변수에 미치는 영향이 상당함을 알 수 있다. 수증기 변수의 경우, NoGPS 실험과 GEOOPT 실험 모두에서, 통계적으로 유의미한 예측오차의 증가나 감소를 관찰할 수 없다. 동서 방향의 바람의 경우, 약 6일 이후의 예측에서부터 GEOOPT 실험의 예측오차가 CTL 실험에 비해 감소하는 모습을 보인다 (일부 구간에서는 통계적으로 유의미). 남북 방향의 바람의 경우, 동서 방향의 바람에 비해, 예보선행시간에 따른 변화폭이 크며, 남북 방향의 바람에 비해 뚜렷하지는 않지만, 약 8일 이후의 예측부터 GEOOPT 실험의 예측오차가 CTL 실험에 비해 감소하는 것을 볼 수 있다. 정리하면, GPS RO 관측자료의 동화효과는 온도 변수에서 가장 크게 나타나며, 재분석자료를 이용한 검증결과와 달리, 예보선행시간이 증가했을 때, 바람 변수의 예측오차가 (CTL 실험에 비해) GEOOPT 실험에서 감소하는 것을 확인할 수 있다.



KMA  
극지연구소

Forecast Verification using Radiosonde from Araon



Forecast Verification using Radiosonde from Araon

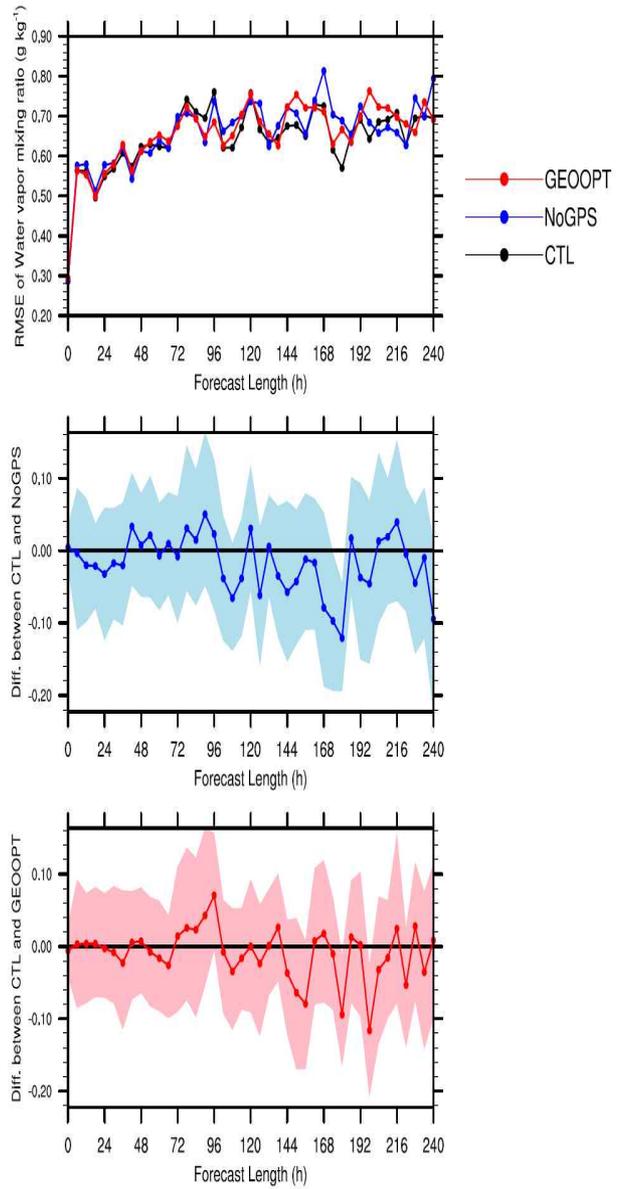


그림 53. 쇄빙선 아라온호에서 획득한 라디오존데 그림 54. 그림 53과 같으나, 수증기 혼합비 변수에 관측자료를 기준으로 계산한, 온도 변수에 대한 근대한 결과.

제공평균오차. 예보선행시간의 함수로 CTL (검은 색), NoGPS (파란색), GEOOPT (빨간색) 실험에 대해 나타냄. CTL 실험과 NoGPS 실험의 예측오차 차이, 그리고 CTL 실험과 GEOOPT 실험의 예측오차 차이를, 불확실성과 함께 나타냄.

Forecast Verification using Radiosonde from Araon

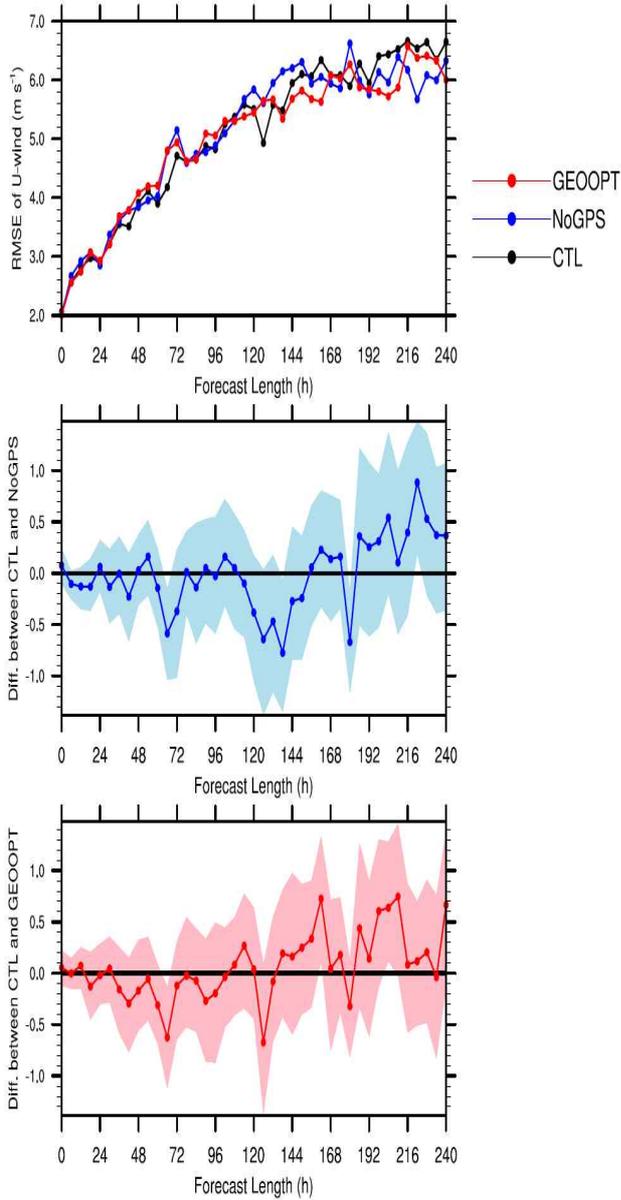


그림 55. 그림 53과 같으나, 동서 방향 바람 변수에 대한 결과.

Forecast Verification using Radiosonde from Araon

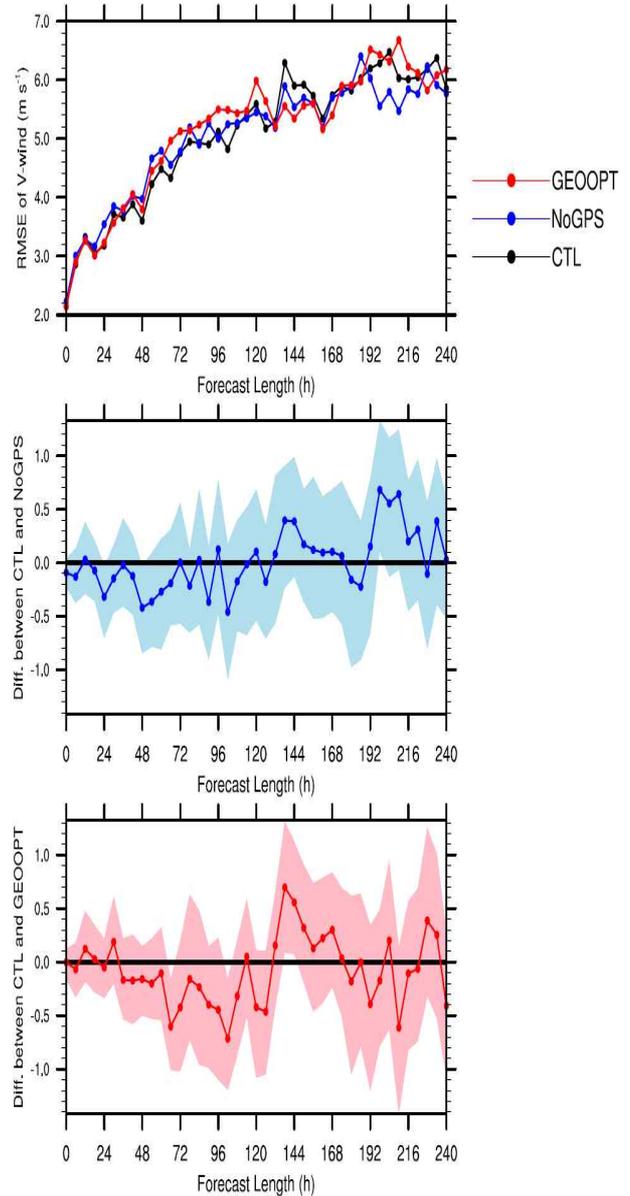


그림 56. 그림 53과 같으나, 남북 방향 바람 변수에 대한 결과.

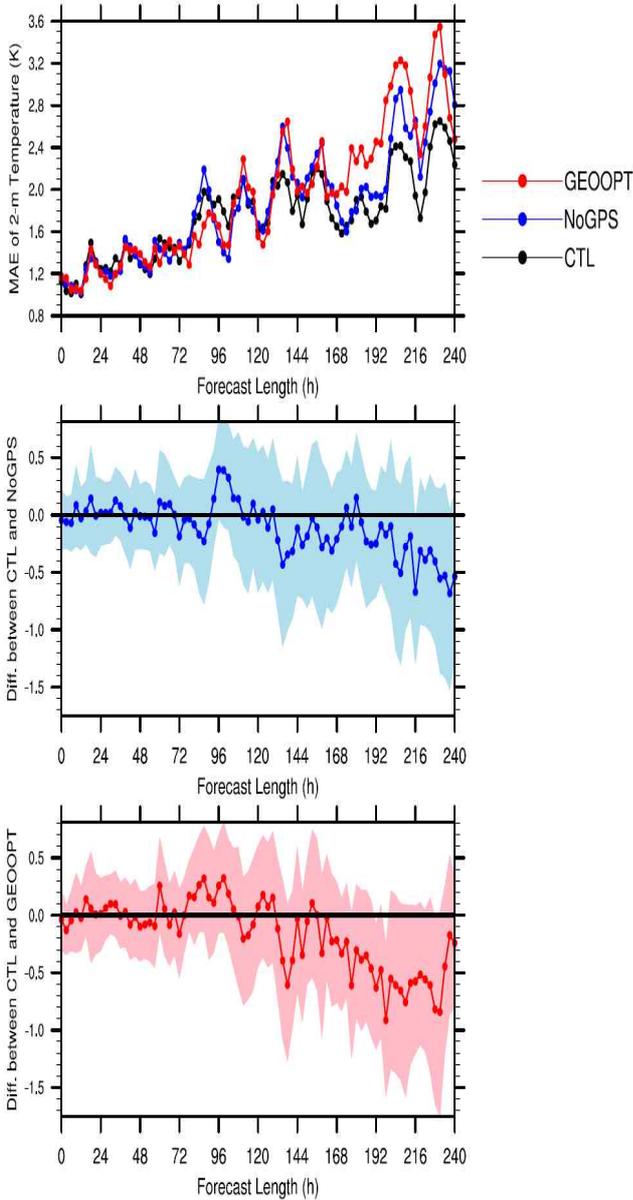
아래온호에서 획득한 선상 AWS 관측을 이용하여 각각의 실험에 대한 오차를 계산한 결과를 그림 57-61에 나타내었다. 온도 변수의 경우, 약 6일 이후의 예측부터 NoGPS 실험과 GEOOPT 실험의 예측오차가 CTL 실험에 비해 증가하며, 이러한 경향은 GEOOPT 실험에서 더 뚜렷하게 나타난다. 수증기 변수의 경우, 두 실험 모두, 예보선행시간에 따른 변동폭이 커서 통계적으로 유의미한 변화를 찾을 수 없다. 압력 변수의 경우, 예측초기 (약 48시간까지)에 NoGPS 실험에서는 CTL 실험 대비 예측오차의 감소가, 그리고 GEOOPT 실험에서는 예측오차의 증가가 나타나며, 10일 예측에서는 두 실험 모두에서 예측오차가 감소하는 모습을 보인다. 그림에서 제시하지는 않았지만, 예보선행시간이 증가할수록, CTL 실험에서 나타나는 해면 기압의 과소모의 경향 (저기압이라면, 과도한 발달)이, GEOOPT 실험에서 심화되어 나타나고

반면 NoGPS 실험에서는 완화되는 모습을 보인다. 동서 방향의 바람의 경우, 라디오존데 관측을 이용한 검증결과와 같이, 약 6일 이후 예측부터 GEOOPT 실험의 예측오차가 CTL 실험에 비해 감소하는 모습을 나타낸다 (일부 구간에서는 90% 유의수준에서 통계적으로 유의미). 남북 방향의 바람에서도 약 8일 이후의 예측부터, GEOOPT 실험의 예측오차가 CTL 실험의 오차에 비해 작아지는 모습을 보인다. 정리하면, 아라온호 선상 AWS 관측을 이용한 검증결과는, 라디오존데 관측을 이용한 검증결과와 대부분 일치하나 (특히, 바람 변수), 온도 변수의 경우, 라디오존데 관측을 이용한 검증결과와 달리, 예보선행시간이 길어지면 NoGPS 실험과 GEOOPT 실험의 예측오차가 CTL 실험에 비해 증가한다.

재분석자료인 ECMWF ERA5, NCEP FNL, 자체 분석장, 그리고 아라온호 라디오존데 및 선상 AWS 관측을 이용한 검증결과를 종합해 보면, 기존 GPS RO 관측자료를 제외한 NoGPS 실험에서, (CTL 실험 대비) 온도와 지위고도 변수의 예측오차가 약 120시간 예측까지 증가하고, 예보선행시간이 8일보다 커지면 지위고도, 바람 변수의 예측오차가 오히려 감소하는 모습을 보인다. 그리고 GeoOptics 큐브위성으로부터 획득한 GPS RO 관측자료를 추가로 동화한 GEOOPT 실험에서는, (분석장의 개선 효과가 오래 지속되지는 않지만) CTL 실험 대비, 온도 변수의 예측오차가 예측초반 감소하고, 예보선행시간이 길어지면 지위고도와 바람 변수의 예측오차가 오히려 증가하는 모습을 보인다. 앞으로 더욱 심도있는 분석이 필요하지만, 북극해에서 저기압이 발달했던 경우와 고기압이 발달했던 경우로 나누어 예측오차를 분석해 보면, WRF 모형 내 대기 하층 음의 온도 편차가 현열속과 잠열속의 지속적인 과다모의를 야기하고, 이로 인해 GPS RO 관측자료 동화에 의한 상부 대류권, 하부 성층권 음의 온도 편차 개선 효과가 제한되는 것으로 판단된다.

극지연구소

Forecast Verification using Ship from Araon



Forecast Verification using Ship from Araon

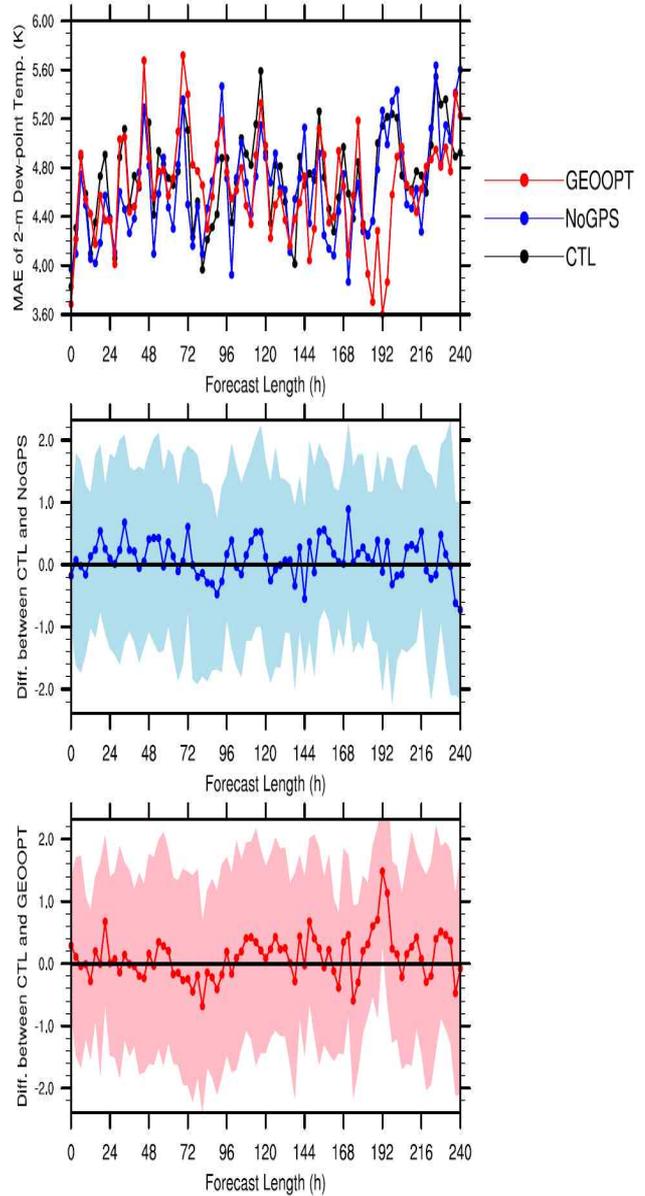
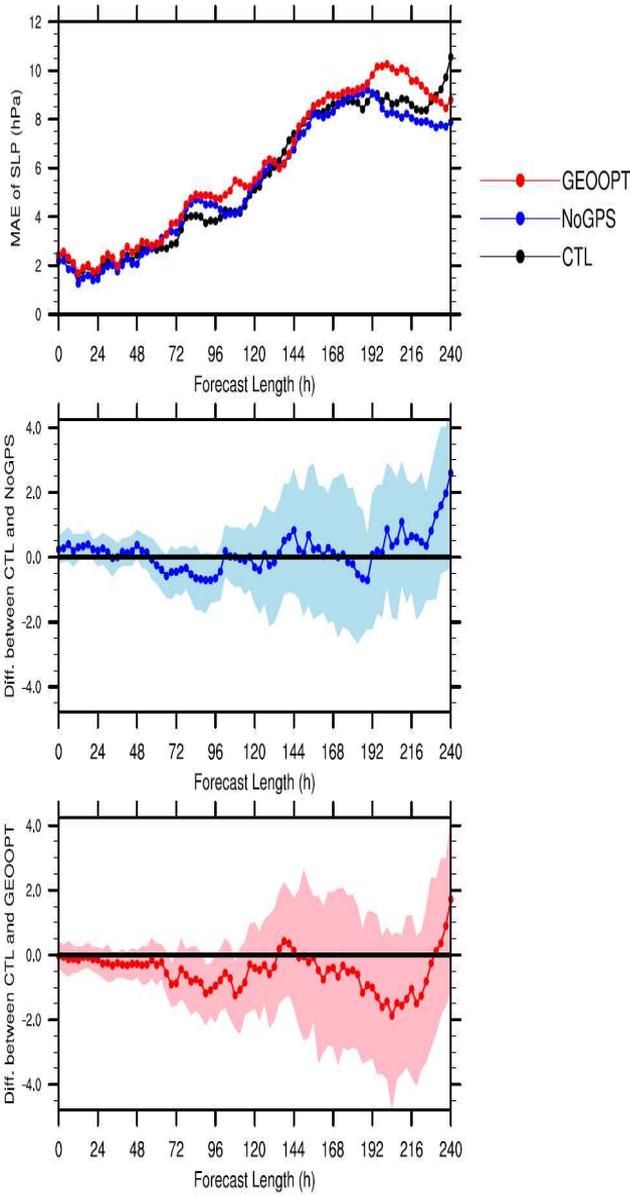


그림 57. 쇄빙선 아라온호에서 획득한 AWS 관측자그림 58. 그림 57과 같으나, 2-m 이슬점 온도 변수를 기준으로 계산한, 2-m 온도 변수에 대한 평균에 대한 결과.

절대오차. 예보선행시간의 함수로 CTL (검은색), NoGPS (파란색), GEOOPT (빨간색) 실험에 대해 나타냄. CTL 실험과 NoGPS 실험의 예측오차 차이, 그리고 CTL 실험과 GEOOPT 실험의 예측오차 차이를, 불확실성과 함께 나타냄.

Forecast Verification using Ship from Araon



Forecast Verification using Ship from Araon

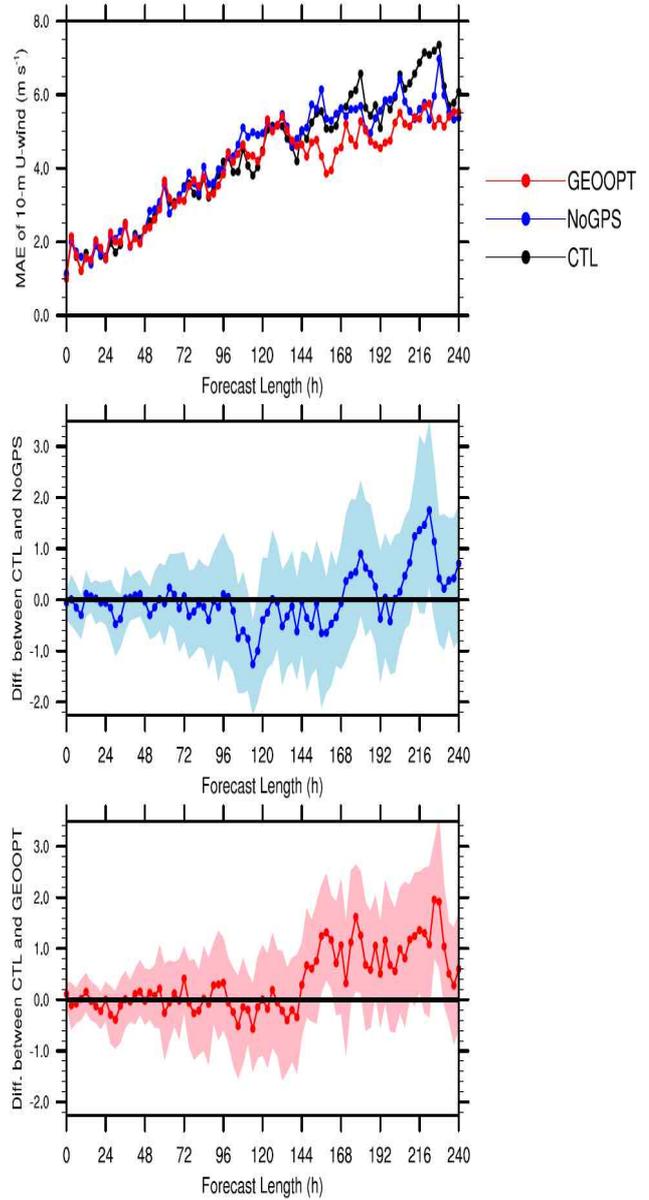


그림 59. 그림 57과 같으나, 해면기압 변수에 대한 결과.

그림 60. 그림 57과 같으나, 10-m 동서 방향 바람 변수에 대한 결과.

### Forecast Verification using Ship from Araon

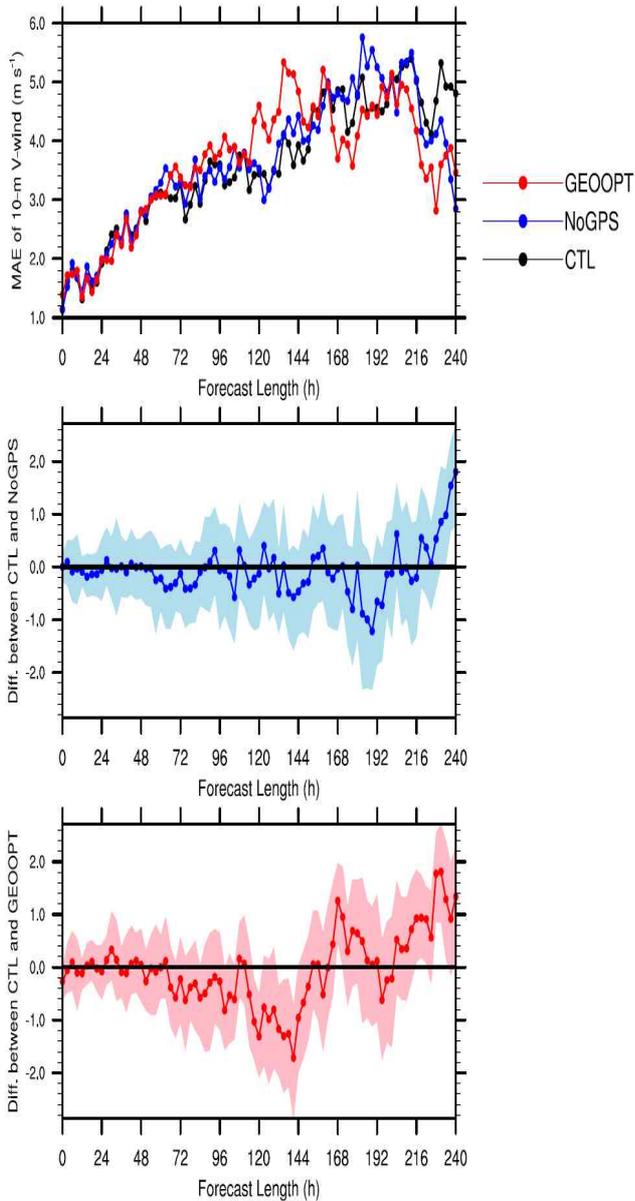


그림 61. 그림 57과 같으나, 10-m 남북 방향 바람 변수에 대한 결과.

그림 62-65는 특정 변수 (200-hPa 온도/지위고도, 500-hPa 온도/지위고도)에 대해, ERA5 재분석자료 대비 편차 (bias)를 각각의 자료동화 사이클 (y축)과 예보선행시간 (x축)에 대해 나타낸 것이다. CTL 실험에서, 모든 자료동화 사이클에 대해, 200-hPa 온도의 음의 편차 (cold bias)가 존재하고, 이러한 편차는 예측이 진행될수록 증가하는 경향을 보인다. 기존 GPS RO 관측자료를 동화에서 제외한 NoGPS 실험에서는, GPS RO 관측자료 동화에 의한 온도 분석장의 개선효과가 사라지면서 예측초기에 온도의 음의 편차가 증가하는 모습을 보인다. 반면, GeoOptics 큐브위성으로부터 획득한 GPS RO 관측자료를 추가로 동화한 GEOOPT 실험에서는, (CTL 실험과 NoGPS 실험의 차이만큼 차이가 크지는 않지만) CTL 실험에 비해, 예측초기에 온도의 음의 편차가 줄어든 것을 확인할 수 있다. 200-hPa 지위고도의 편차의 경우, 온도

편차의 증가 혹은 감소의 영향으로, NoGPS 실험과 GEOOPT 실험에서 각각 (CTL 실험 대비) 그 편차가 증가 혹은 감소한 것을 볼 수 있다. 500-hPa 온도의 경우, CTL 실험에서 거의 모든 자료동화 사이클과 예보선행시간에 대해, 양의 편차를 보인다. NoGPS 실험에서는, 동화과정에서 GPS RO 관측자료의 배제로 예측초기에 온도의 양의 편차가 증가하는 모습을 보인다. 반면, GEOOPT 실험에서는 예측초기에 온도의 양의 편차가 약간 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 500-hPa 지위고도의 편차는, 온도 편차의 영향으로, (CTL 실험 대비) NoGPS 실험에서 예측초기에 약간 증가, 그리고 GEOOPT 실험에서 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 정리하면, GPS RO 관측자료의 동화는, 200-hPa 고도에 존재하는 온도의 음의 편차와 500-hPa 고도에 존재하는 온도의 양의 편차를 줄여주는 역할을 하며, 개선된 분석장은 이후 예보장에도 영향을 주는 것으로 보인다. 수증기 변수보다는 온도 변수에, 그리고 대기 하층보다는 중상층에서 GPS RO 관측자료 동화에 의한 온도 변수 개선 효과가 두드러지게 나타난다.



Forecast Bias against ERA5 (200-hPa T)      Forecast Bias against ERA5 (200-hPa Z)

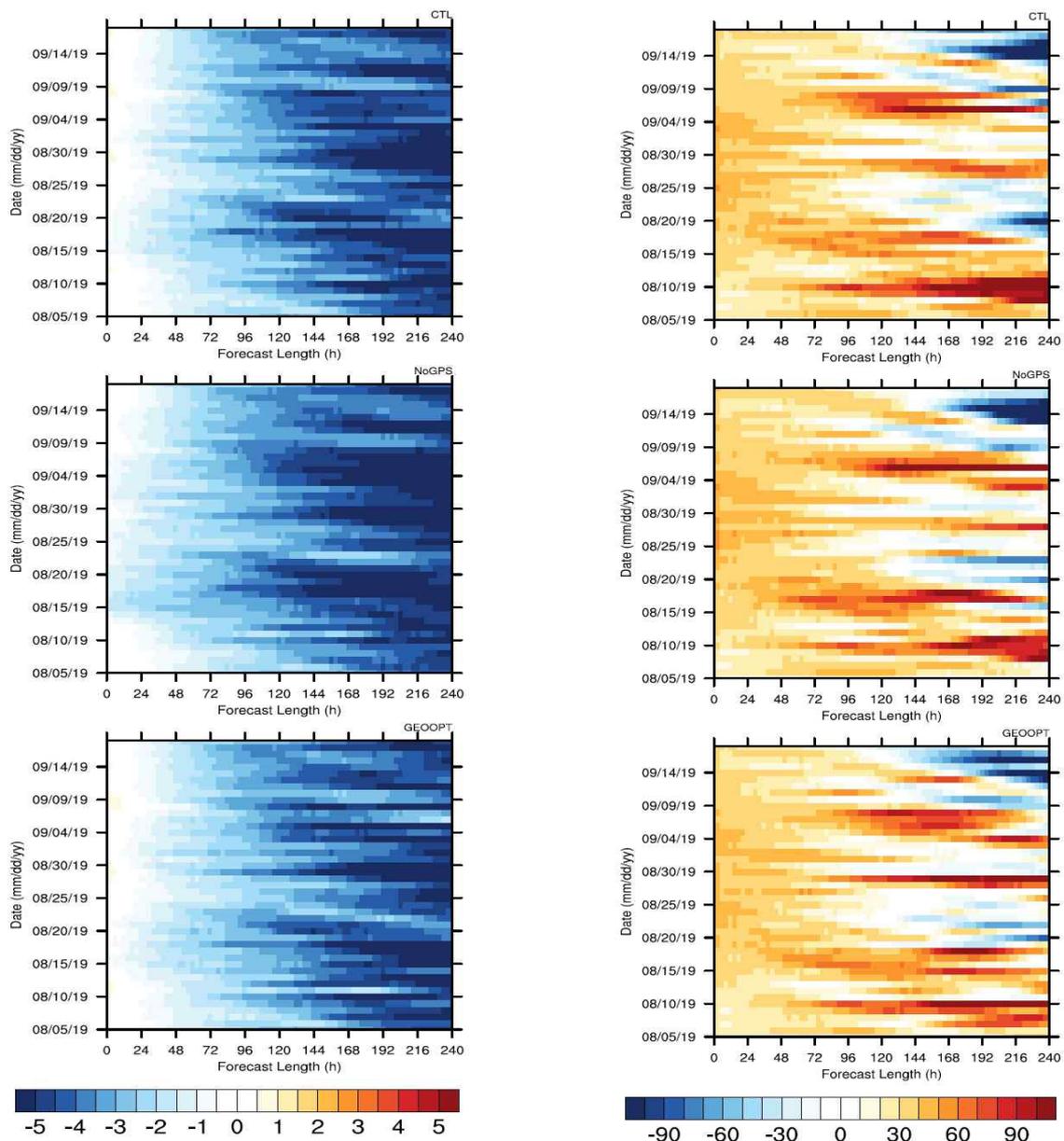


그림 62. ECMWF ERA5 재분석자료 기준, 200-hPa 그림 63. 그림 62와 같으나, 200-hPa 지위고도 변수 온도 예측결과의 편차 분포. 예보선행시간과 자료동에 대한 결과. 화 사이클의 함수로 나타냄.

Forecast Bias against ERA5 (500-hPa T) Forecast Bias against ERA5 (500-hPa Z)

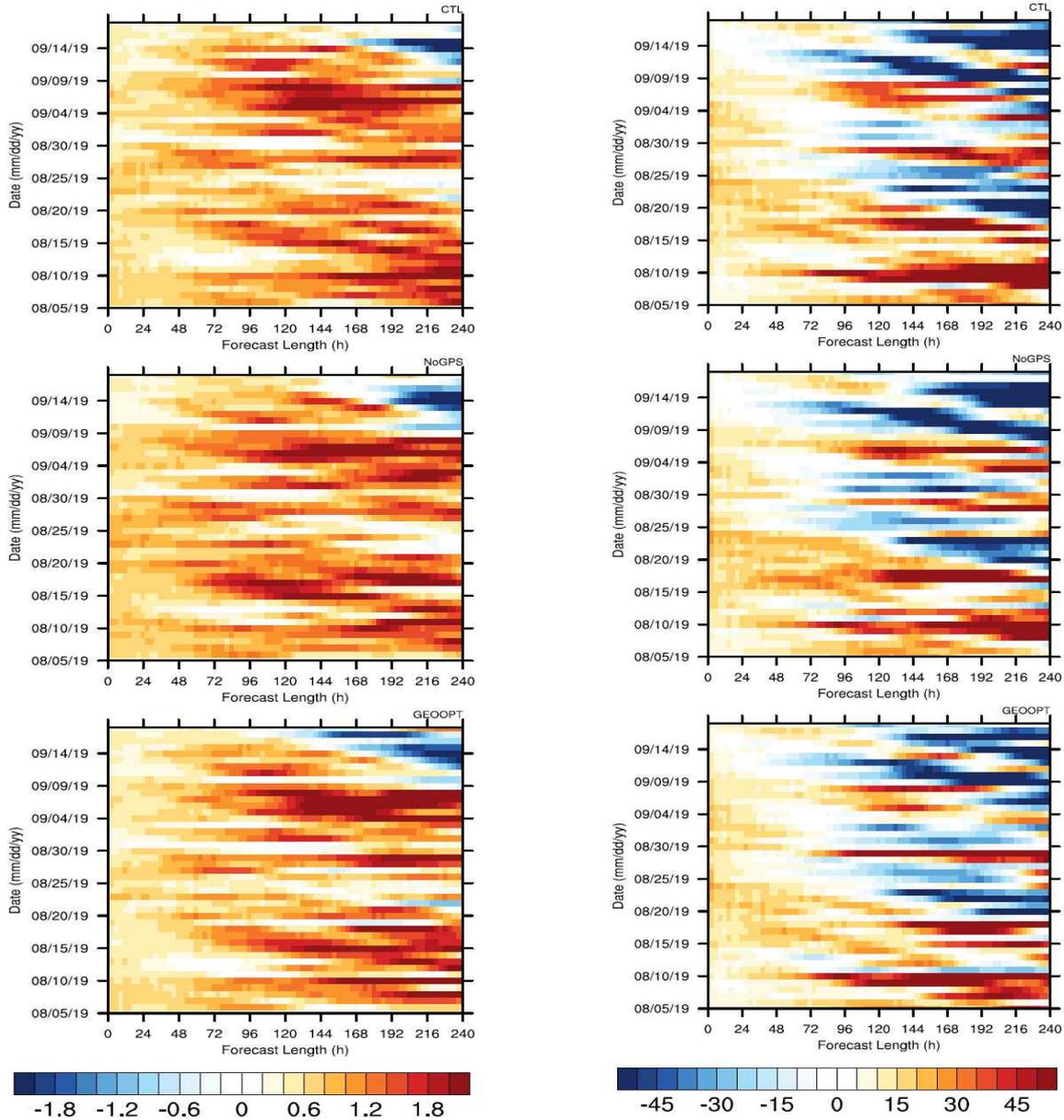


그림 64. 그림 62와 같으나, 500-hPa 온도 변수에 대한 결과.      그림 65. 그림 62와 같으나, 500-hPa 지위고도 변수에 대한 결과.

앞선 분석에서 확인된 온도/지위고도 편차의 수평적 분포를 알아보기 위하여, 5일 예측에 대한 200-hPa 온도, 500-hPa 온도, 그리고 500-hPa 지위고도의 편차 분포를 그림 66-68에 나타내었다. 200-hPa 온도 편차의 경우, CTL, NoGPS, GEOOPT 실험 모두에서 그린란드, 캐나다 북동부, 그리고 척치해 부근에서 강한 음의 편차가 나타난다. NoGPS 실험에서는 이러한 음의 편차가 증가하고, GEOOPT 실험에서는 음의 편차가 감소하며, 이러한 변화는 동시베리아해에서 두드러지게 나타난다. 500-hPa 온도 편차의 경우, 모든 실험에서 양의 편차가 나타나며, 200-hPa 온도 음의 편차 국지적 최대값이 나타난 곳에서 양의 편차의 최대값이 나타난다. 200-hPa 온도와 마찬가지로, 동시베리아해를 중심으로 북극해 지역에서, 온도의 양의 편차가 CTL 실험 대비 NoGPS 실험에서 증가하고, GEOOPT 실험에서 감소한다. 500-hPa 지위고도

편차의 경우, 북극해 지역에서 CTL, NoGPS, 그리고 GEOOPT 실험간의 차이가 관찰되는데, CTL 실험에서는 카라-바렌츠해에 음의 편차가, 그리고 동시베리아해에 양의 편차가 나타난다. NoGPS 실험에서는 음의 편차가 감소하나 양의 편차가 증가하며, GEOOPT 실험에서는 반대의 경향이 나타난다. 정리하면, GPS RO 관측자료의 동화가 대기 중상층의 온도 편차를 줄여 주는 역할을 하지만, 하층에 존재하는 계통적인 온도 편차로 인해, 개선효과의 지속시간이 짧고 다른 변수로의 영향이 제한되는 한계가 있다.

### Horizontal distribution of 5-d forecast error (200-hPa T)

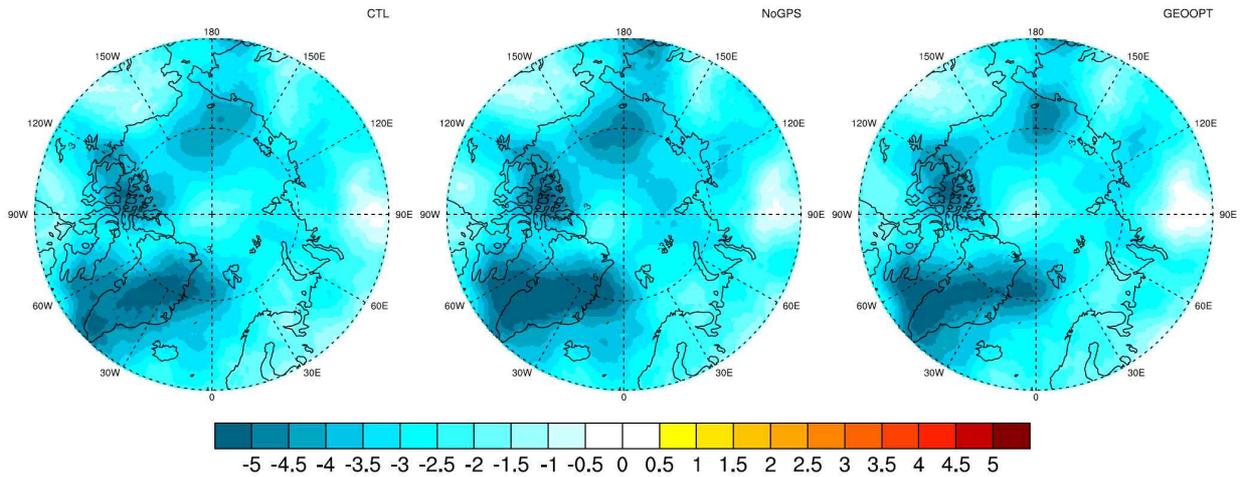


그림 66. ECMWF ERA5 재분석자료를 기준으로 계산한, CTL (왼쪽), NoGPS (가운데), GEOOPT (오른쪽) 실험의 200-hPa 온도 변수 5일 예측 오차 분포 (전체 실험 기간에 대해 평균).

### Horizontal distribution of 5-d forecast error (500-hPa T)

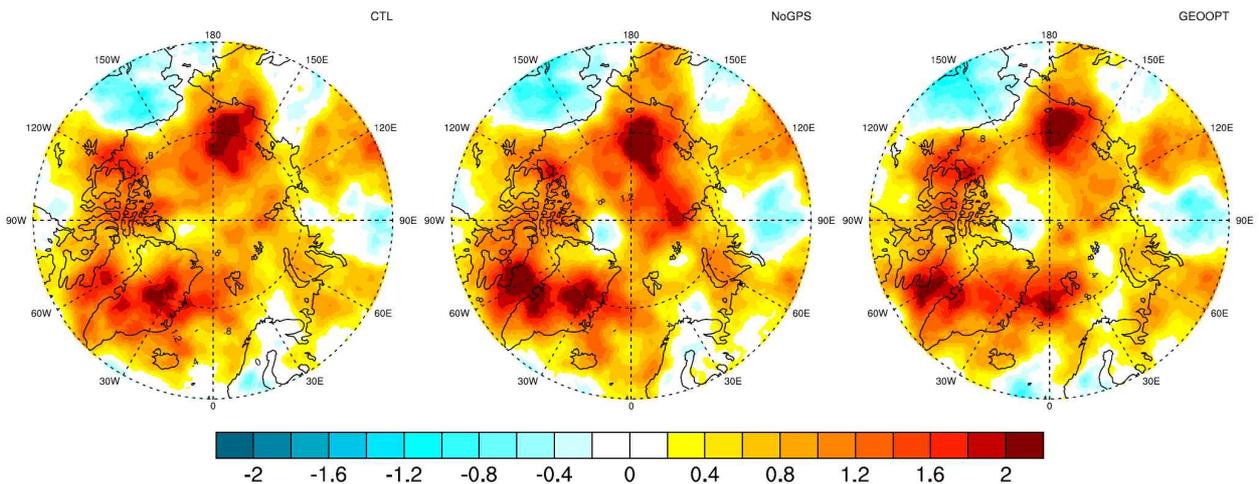


그림 67. 그림 66과 같으나, 500-hPa 온도에 대한 결과.

### Horizontal distribution of 5-d forecast error (500-hPa Z)

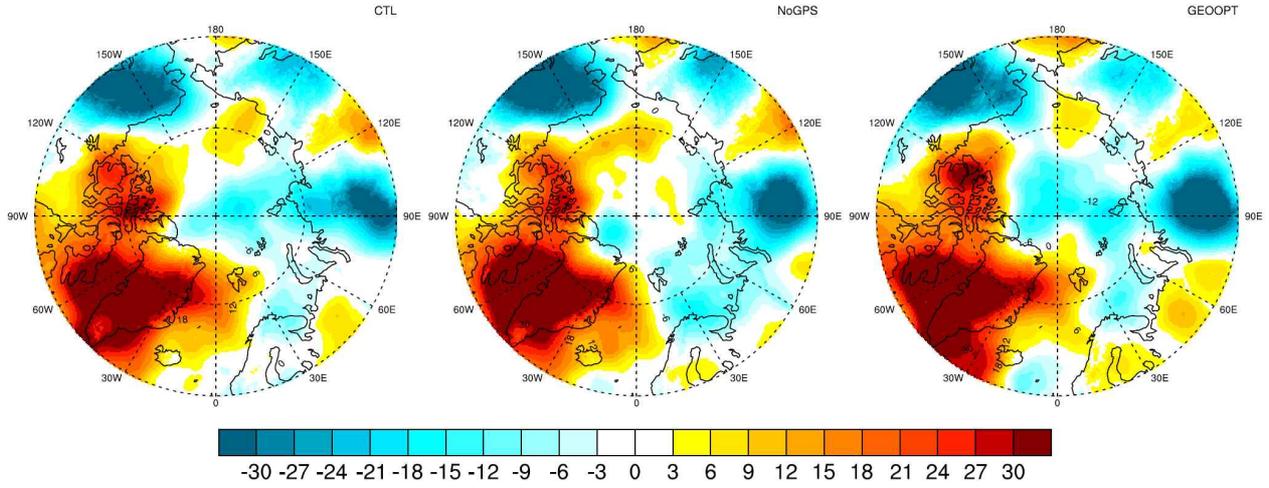


그림 68. 그림 66과 같으나, 500-hPa 지위고도 변수에 대한 결과.



## 2. 수반모형 기반 관측민감도 실험 (FSO) 결과

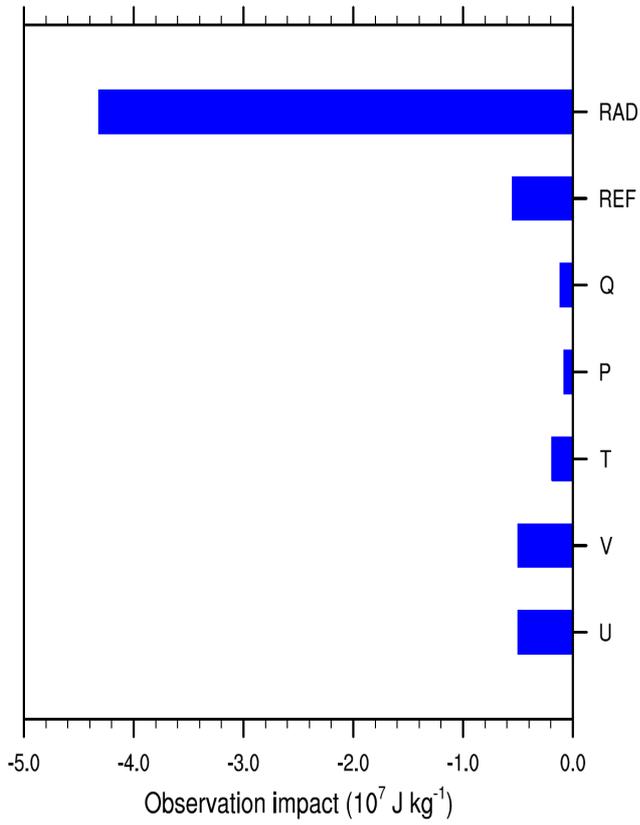
수반모형을 이용한 관측민감도 실험은, 한 번의 실험 (비선형모형, 수반모형, 그리고 자료 동화시스템에 대한 수반모형 수행 포함)으로 관측종, 관측변수, 관측위치에 따른 관측효과 (observation impact)를 계산할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 개발 및 (비선형모형의 업데이트에 맞춘) 유지가 어려운 수반모형이 있어야 하고, 선형가정을 만족 (예, 예측길이)시켜야 하는 한계가 있다. 본 연구에서는, 2019년 8월 5일 00 UTC부터 9월 18일 00 UTC까지의 기간에 대해, 6시간 간격으로, 6시간 예측에 대한 관측민감도를 계산하고 전체 기간에 대한 평균을 분석하였다.

그림 69은 실험기간에 대해 평균한, 관측변수에 따른 관측효과를 나타낸다. 위성 복사휘도 관측과 연관된 RAD 변수의 관측효과가 다른 변수에 비해 압도적으로 크다. 이는 북극 지역의 특성상, 다른 관측종 (예, 라디오존데, 지상, 부이 등)이 다른 지역에 비해 적고, 동시에 위성 관측의 수가 (관측플랫폼의 특성상) 많기 때문이다. 다음으로, 바람 변수 (U, V)와 굴절률 변수 (REF)에 대한 관측효과가 큰 것으로 나타난다. 바람 변수의 경우, 라디오존데 등 종관 관측으로부터의 기여도 있지만, 위성관측으로부터 산출한 바람 관측 (예, scatterometer, AMV)의 기여도가 크다. GPS RO 관측은 굴절률 변수로 동화되었는데, 위성 복사휘도 관측 다음으로 예측오차 향상에 기여하는 것으로 나타난다.

그림 70은 관측변수가 아닌 관측종에 따른 관측효과를 나타낸다. 위성 센서 가운데, 적외 센서인 IASI 센서의 기여도가 가장 크게 나타나며, 마이크로파 센서인 AMSU-A와 MHS 센서의 기여도는 예상보다 작다. 이는 WRFDA 시스템에서 해빙이나 눈이 있을 경우, 마이크로파 센서로부터 획득한 관측자료의 동화가 제한되기 때문인 것으로 보인다. GPS RO 관측자료의 예측오차 감소에의 기여는 IASI 센서 다음으로 크게 나타난다. 위성으로부터 산출한 바람과 라디오존데 관측의 기여가 그 뒤를 잇는다. 이를 통해, 해빙 혹은 눈 표면 조건으로 인해 마이크로파 센서 관측의 동화가 제한되고, 라디오존데와 같은 종관 관측의 수가 적은 북극 지역에서, GPS RO 관측자료는 위성 복사휘도 관측자료 (적외센서)와 함께 분석장 및 예보장의 오차를 줄이는 데 있어 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

관측자료의 수가 관측효과에 큰 영향을 주기 때문에, 관측의 수로 나눈 관측효과를 관측변수 (그림 71) 그리고 관측종 (그림 72) 별로 제시하였다. 관측변수 별로 기여도를 비교했을 때, 동화에 사용된 관측의 수로 나누더라도 위성 복사휘도 관측의 기여는 압도적으로 큰 것으로 나타났다. 이후 바람 변수, 온도 변수, 압력 변수, 굴절률 변수 순으로 기여도가 큰데, 이는 바람, 온도, 압력 변수에는 (관측의 수가 상대적으로 적은) 종관 관측의 효과가 반영되기 때문으로 보인다. 마지막으로, 관측종 별로, 관측의 수로 나누어 표현한 관측효과에 있어서는, 적외 센서인 IASI와 AIRS 센서로부터 획득한 관측자료의 효과가 가장 크게 나타났다. 그 뒤로 마이크로파 센서인 ATMS, AMSU-A, MHS 센서, 지상관측 (SYNOP, METAR), 라디오존데관측 (SOUND), 부이관측 (BUOY), 선박관측 (SHIP), 그리고 GPS RO 관측자료의 순으로 관측효과가 크게 나타났다.

Observation Impact by Variable



Observation Impact by Type

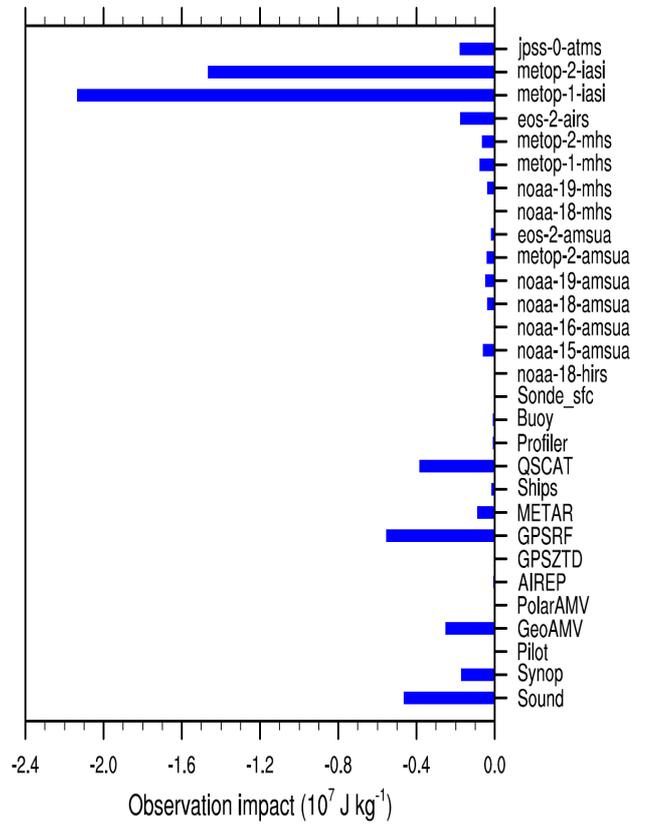


그림 69. 수반모형 기반 관측민감도 실험으로부터 그림 70. 그림 69와 같으나, 관측종에 따라 제시한 계산한, 관측변수 별 관측효과 (전체 실험 기간에 걸쳐 평균).

극지연구소



## 제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외기여도

### 제 1 절 목표달성도

#### 1. 대기모형과 3차원 변분 자료동화 방법을 이용한, GPS RO 관측자료 동화 및 예측 실험 수행

- 가. 지역규모 대기모형으로 WRF 모형을 선정하고, WRF 모형을 연구소 계산 서버에 설치함
- 나. 선행 연구결과를 바탕으로, WRF 모형 수행을 위한 모의영역 (북극해를 중심으로 하는 27 km 해상도 모의영역), 초기 및 측면경계조건 (실시간 예측을 염두에 두고 미국기상청에서 운영중인 GFS 예보장), 물리과정 (적운모수화, 미세물리, 대기경계층, 복사물리, 그리고 지면물리과정) 등을 결정함
- 다. GPS RO 관측자료 동화를 위한 자료동화시스템으로는 WRFDA 시스템을 선정하고, 계산량을 고려하여 3차원 변분 자료동화 방법을 이용하여 자료동화 실험을 수행
- 라. 전문가 자문결과를 바탕으로, GPS RO 관측자료 동화시, 관측변수로는 굴절률 (refractivity), 그리고 관측연산자로는 로컬 관측연산자 (local observation operator)를 선택함
- 마. 배경오차공분산은 NMC 방법을 이용하여 계산함
- 바. 쇄빙선 아라온호의 2019년 북극 항해 기간 (2019년 8월 5일 ~ 2019년 9월 18일)에 대해, 6 시간 간격으로 자료동화를 수행하고 24시간 간격으로 10일 예보를 수행
- 사. 총 3가지 OSE 실험을 수행하는데, CTL 실험에서는 종관, 위성 복사휘도, (기존의) GPS RO 관측자료를, NoGPS 실험에서는 CTL 실험과 달리 GPS RO 관측자료를 제외한 관측자료를, 그리고 GEOOPT (혹은 SPIRE) 실험에서는 CTL에서 동화한 관측자료 외에 GeoOptics (혹은 Spire) 기상회사에서 획득한 GPS RO 관측자료를 추가로 동화함

#### 2. 수반모형 기반의 관측민감도 실험 수행

- 가. 수반모형을 이용한 관측민감도 실험 수행을 위해, 비선형모형인 WRF 모형에 대한 수반모형 (adjoint model)을 연구소 계산서버에 추가로 설치함
- 나. 예보오차를 정의하기 위한 기준값 (truth; 자체 분석장)과 메트릭 (metric; 건조 총 에너지), 그리고 근사 정도를 결정함
- 다. OSE 실험을 수행한 기간에 대해 관측민감도 실험을 수행하고 그 결과를 분석함

#### 3. GPS RO 관측자료의 동화가 북극 지역 날씨 예측에 미치는 영향 분석

- 가. 예측결과를 검증하기 위한 기준값 (혹은 참값)으로 가장 품질이 좋은 것으로 알려진, ECMWF ERA5 재분석자료를 사용함
- 나. 재분석자료 외에 자체 분석장, 아라온호에서 획득한 라디오존데 관측자료, 선상 관측자료를 검증에 활용함
- 다. GPS RO 관측자료 동화의 영향을 가장 크게 받을 것으로 예상되는 온도, 습도 변수 외에 지위고도, 바람 등의 변수에 대해 근제곱평균오차, 편차, 그리고 공간상관계수를 계산함
- 라. 수행한 세 가지 OSE 실험을 비교·분석하여, GPS RO 관측자료의 동화가 북극 지역 분석장 및 예보장에 미치는 영향을 정량화함
- 마. OSE 실험 분석 결과를 수반모형 기반 관측민감도 실험 결과와 비교하여, GPS RO 관측자료 동화의 북극 지역 날씨 예측성에의 영향을 종합적으로 판단함

## 제 2 절 대외기여도

본 과제를 통해 수행한 연구결과를 정리하여 논문으로 작성할 예정임. SCI(E)급 저널에 제출하여 GPS RO 관측자료 (특히, 큐브위성으로부터 획득한) 동화의 북극 지역 날씨 예측에 대한 영향 연구 결과를 발표하고, 이는 GPS RO 관측자료 동화 및 북극 날씨 예측 분야에 기여할 것으로 예상됨.



## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- GPS RO 관측자료 동화를 통해 소내 다른 주요사업을 통해 구축된, 극지 날씨 예측 시스템 (Korea Polar Prediction System-Weather; KPOPS-Weather)의 예측성을 높여, 북극 및 남극 지역의 (준)실시간 날씨 예측을 수행하고 예측 결과를 현장활동을 위한 참고자료로 활용
- GPS RO 관측자료의 동화를 (성층권을 포함하는) 전구 대기 모형으로 확장하여 한반도 재해기상 현상의 예측성을 높이기 위한 기초기술로 활용
- 대기-해양-해빙 결합 모형에 적용하여, 지구시스템 모델과 결합자료동화 시스템을 이용한 한반도 계절예측에 활용
- 해빙 모형의 외부 대기 강제력을 개선하여, 북극 해빙 예측의 예측성을 높이기 위한 기초기술로 활용
- GPS RO 관측자료 외에, 해빙 조건 하에서의 위성 복사휘도 관측자료, 위성으로부터 산출된 바람관측자료의 동화 연구로 확장하여, 북극 지역 및 한반도 악기상 현상의 예측성을 높이기 위한 기초연구로 활용
- 극지 인프라에서 상시 혹은 특별 관측을 통해, WRF 모형 예측결과에서 확인한 대류권계면 근처, 그리고 지표면 근처에서의 음의 온도 편차를 검증하고, 검증 결과를 바탕으로 모형을 개선하는 연구 추진

## 제 6 장 참고문헌

- Anlauf, H., D. Pingel, and A. Rhodin, 2011: Assimilation of GPS radio occultation data at DWD. *Atmos. Meas. Tech.*, **4**, 1105-1113.
- Barker, D., and co-authors, 2012: The Weather Research and Forecasting Model's community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 831-843.
- Bowler, N. E., 2020: An assessment of GNSS radio occultation data produced by Spire. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **2020**, 1-17.
- Cucurull, L., J. C. Derber, R. Treadon, and R. J. Purser, 2007: Assimilation of global positioning system radio occultation observations into NCEP's global data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3174-3193.
- Cucurull, L., and J. C. Derber, 2008: Operational implementation of COSMIC observations into NCEP's global data assimilation system. *Wea. Forecasting*, **23**, 702-711.
- Ha, J.-H., J.-H. Kang, and S.-J. Choi, 2018: The impact of vertical resolution in the assimilation of GPS radio occultation data. *Wea. Forecasting*, **33**, 1033-1044.
- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculation with the AER radiative transfer model. *J. Geophys. Res.*, **113**, D13103.
- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain era coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927-945.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170-181.
- Lawrence, H., N. Bormann, I. Sandu, J. Day, J. Farman, and P. Bauer, 2019: Use and impact of Arctic observations in the ECMWF numerical weather prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 3432-3454.
- Lorenc, A. C., and R. T. Marriott, 2014: Forecast sensitivity to observations in the Met Office global numerical weather prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 209-224.
- Ma, Z., Y.-H. Kuo, F. M. Ralph, P. J. Neiman, G. A. Wick, E. Sukovich, and B. Wang, 2011: Assimilation of GPS radio occultation data for an intense atmospheric river with the NCEP regional GSI system. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 2170-2183.
- Morrison, H., G. Thompson, and V. Tatarskii, 2009: Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 991-1007.

- Parrish, D. F., and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center's spectral statistical interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747-1763.
- Poli, P., S. B. Healy, and D. P. Dee, 2010: Assimilation of global positioning system radio occultation data in the ECMWF ERA-Interim reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1972-1990.
- Rennie, M. P., 2010: The impact of GPS radio occultation assimilation at the Met Office. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 116-131.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, 113 pp.
- Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca, 2004: Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. *20<sup>th</sup> conference on weather analysis and forecasting/16<sup>th</sup> conference on numerical weather prediction*, pp. 11-15.
- Wee, T.-K., Y.-H. Kuo, D. H. Bromwich, and A. J. Monaghan, 2008: Assimilation of GPS radio occultation refractivity data from CHAMP and SAC-C missions over high southern latitudes with MM5 4DVAR. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2923-2944.
- Yue, X., W. S. Schreiner, N. Pedatella, R. A. Anthes, A. J. Mannucci, P. R. Straus, and J.-Y. Liu, 2014: Space weather observations by GNSS radio occultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2. *Space Weather*, **12**, 616-621.
- Zhang, X., X.-Y. Huang, J. Liu, J. Peterjoy, Y. Weng, F. Zhang, and H. Wang, 2014: Development of an efficient regional four-dimensional variational data assimilation system for WRF. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **31**, 2777-2794.

## 연구·정책지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

과제 구분	(신진연구자 지원과제)		
과제명	GPS RO 관측자료 동화의 북극 지역 날씨 예측에의 영향 연구 (계정번호: PE20390)	연구기간	2020. 05. 01.~2020. 12. 31.
연구책임자	최 용 한	연구비(직접비)	30,000 천원
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항			
<p>(1) 과제의 목적</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 지역규모 대기모형과 3차원 변분 자료동화 방법을 이용한 GPS RO 관측자료 동화의 북극 지역 날씨 예측에의 영향 분석</li> </ul> <p>(2) 최종성과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 지역규모 대기모형, WRF 모형과 자료동화시스템, WRFDA 시스템을 활용하여, 관측 시스템 실험 (OSE)을 수행함</li> <li>○ 수반모형 기반의 관측민감도 (FSO) 실험을 수행함</li> <li>○ 관측 시스템 실험과 관측민감도 실험 결과를 분석하여, GPS RO 관측자료 동화가 대류권 상부와 성층권 하부에 존재하는 음의 온도 편차를 줄이고, 이러한 온도 변수 개선이 북극 지역 날씨 예측성을 높이는 데 기여할 수 있음을 확인함</li> <li>○ 큐브위성으로부터 획득한 GPS RO 관측자료의 동화는, 관측자료의 양이 상대적으로 적은 극지역의 날씨 예측성 향상에 큰 기여를 할 수 있음을 보임</li> </ul> <p>(3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기구축된 KPOPS-Weather 시스템에 적용하여, 극지역 날씨 예측성 향상에 활용</li> <li>○ 지구시스템 모델의 대기 초기조건 개선에 활용하여, 한반도 계절예측의 예측성 향상 도모</li> </ul> <p>(4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항</p>			
평가의견	반영사항	비고	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 향후 극지 인프라(남극과 북극과학기지, 쇄빙연구선 아라온)를 활용하여 모델 연구를 보정(보완)할 수 있는 방안에 관하여 기술 요망</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ WRF 모형을 이용한 날씨 예측 분석을 통해, 대류권계면 근처에 음의 온도 편차가, 그리고 모형 최하층에 역시 음의 온도 편차가 존재함을 발견함. 향후, 극지 인프라에서 이러한 모형의 계통적 오차를 검증할 수 있는 관측자료 (예, 북극해 플릭스 관측 등)를 획득하여, 모형 개선에 활용할 예정임.</li> </ul>	연구보고서 p.63 참조	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 북극에서 관측 유형별 영향에 대한 적절한 해석 방안 기술 요망</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수반모형 기반 관측민감도 실험의 결과를, 선행연구결과와 비교하여 해석함.</li> </ul>	연구보고서 p.58-60 참조	
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ WRF 예측 실험에서 GPS 차폐자료의 영향에 대한 명확한 해석 기술 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ GPS 차폐자료의 동화가 북극 지역 날씨 예측에 미치는 영향을, 저기압 발달 시기와 고기압 발달 시기로 나누어 해석함.</li> </ul>	연구보고서 p.33-37 참조	

## 뒷 면

### 주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.