

극지 기후 예측 성능 향상을 위한
미세 구름 물리 모델 개발

(Development of a Cloud Physics Parameterization for
the Improved Forecasting of Polar Climate)



서 울 대 학 교
산 학 협 력 단

제 출 문

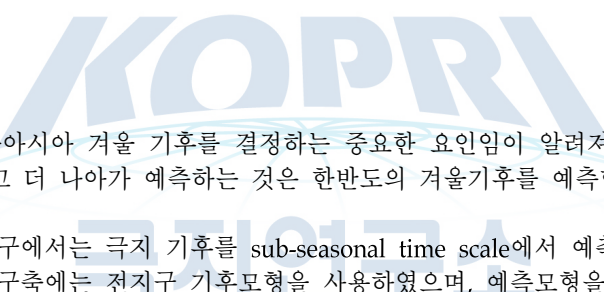
극지연구소장 귀하

본 보고서를 “기후변화/기상재해 예측을 위한 극지 예측 시스템(KPOPS)의 개발 및 활용 연구” 과제의 위탁연구 “극지 기후 예측 성능 향상을 위한 미세 구름 물리 모델 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	:	김 주 흥
위탁연구기관명	:	서울대학교
위탁연구책임자	:	박 성 수
위탁참여연구원	:	신 지 훈
“	:	김 시 윤
“	:	송 찬 우
“	:	오 은 실

보고서 초록

위탁연구과제명	극지 기후 예측 성능 향상을 위한 미세 구름 물리 모델 개발				
위탁연구책임자	박성수	해당단계 참여연구원수	5 명	해당단계 연구비	63 백만원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	31 장
 <p>극지역 기후는 동아시아 겨울 기후를 결정하는 중요한 요인이 알려져 있음. 이에 따라 극지에서의 기후변동을 이해하고 더 나아가 예측하는 것은 한반도의 겨울기후를 예측함에 있어 중요함.</p> <p>이에 따라, 본 연구에서는 극지 기후를 sub-seasonal time scale에서 예측할 수 있는 시스템을 구축하고자 했음. 시스템 구축에는 전지구 기후모형을 사용하였으며, 예측모형을 10월 1일과 12월 1일에 시작하여 최대 4달 간 모델적분을 실시하여 극지 및 동아시아의 겨울 기후를 예측해보고자 함.</p> <p>연구에서 사용한 전지구 기후모형은 기존 NCAR에서 사용하고 있는 CAM4 모델과 더불어 차세대 구름겹침 모수화가 적용된 CAM5-UNICON 모델이며, 두 기후모형을 사용한 극지기후 예측 시스템의 성능을 비교해보고자 함.</p> <p>본 연구를 진행함에 있어, 우선적으로 과거 15년 간의 겨울기후예측을 실시하였으며 이를 다양한 통계기법을 이용하여 정량적으로 평가함. 연구의 결과는 향후 겨울기후 예측을 위한 시스템 구축의 개발에 개선점을 제시하는 방향으로 사용될 수 있음.</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	극지구름, 전지구기후모델, 구름겹침 모수화, 극지-중위도 예측시스템, 극지 기후			
	영 어	Arctic cloud, General Circulation Model, Cloud Overlap Parameterization, Arctic-Midlatitude Prediction System, Polar Climate			

요 약 문

I. 제 목

□ 위탁연구 과제명

극지 기후 예측 성능 향상을 위한 미세 구름 물리 모델 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

□ 연구개발의 필요성

극지에서의 기후변동은 단순히 극지역에 영향을 미치는 것을 넘어 한반도 및 동아시아 지역의 겨울 기후를 결정하는 중요한 요인으로 알려져 있음. 따라서 한반도의 겨울 기후를 예측함에 있어 극지역의 기후를 정확히 예측하는 시스템이 필요함.

□ 연구개발의 목적

본 연구의 목적은 차세대 구름궤적 모수화를 적용한 새로운 모델인 CAM5-UNICON을 이용하여 극지기후를 예측해보는 것임. 더 나아가, 극지기후 예측 결과에 대한 다양한 방식의 정량적 평가를 실시하는 것임.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 차세대 구름궤적 모수화가 적용된 CAM5-UNICON을 이용하여 극지기후를 예측해보고, 그 시스템의 성능을 정량적으로 평가할 것임.

IV. 연구개발결과

본 연구에서는 기존 모델 CAM4 및 새로운 모델 CAM5-UNICON을 사용하여 과거 2001년부터 2015년의 극지 및 북반구 겨울기후를 예측함. 또한 예측결과들을 과거의 실제 겨울기후와 비교하는 분석하여 모델의 성능을 평가함.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구의 내용은 향후 극지 겨울기후를 예측하는 시스템을 개발하는데 있어 개선점을 제시하는데 사용될 수 있음.

S U M M A R Y

I. Title

Development of a cloud physics parameterization for the improved forecasting of polar climate

II. Purpose and Necessity of R&D

Polar climate is known to be an important factor which influences winter and climate in East Asia. An accurate prediction of polar climate is necessary for the accurate prediction of weather and climate in Korea.

III. Contents and Extent of R&D

Our R&D predicts the polar climate using a general circulation model with a new cloud overlap parameterization and evaluates the model's performance to predict polar climate.

IV. R&D Results

In this R&D, we predicted the past polar climate from 2001 to 2015 using 2 GCMs, CAM4 and CAM5-UNICON, and compared the model performances using various statistical techniques.

V. Application Plans of R&D Results

Our R&D results can be used to improve the prediction of polar climate with a general circulation model in future.

목 차

제 1 장 서론

제 1 절. 연구개발의 필요성

제 2 절. 연구개발의 필요성

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발 방법 및 세부목표

제 1 절. 연구방법

제 2 절. 연구 세부목표 및 구체적 수행방법

제 4 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절. 연구결과 (1) - climatology 분석

제 2 절. 연구결과 (2) - trend 분석

제 3 절. 연구결과 (3) - ACC 분석

제 4 절. 연구결과 (4) - MSSS 분석

제 5 절. 연구결과 (5) - timeseries 분석

제 6 절. 연구결과 (6) - ART indices 분석

제 5 장 연구개발목표의 달성도

제 6 장 연구개발결과의 활용계획

제 7 장 참고문헌

제 1 장 서론

제 1 절. 연구개발의 필요성

극지에서의 기후변동은 단순히 극지역에 영향을 미치는 것을 넘어 한반도를 포함한 동아시아 지역의 겨울 기후를 결정하는 중요한 요인으로 알려져 있다. 이에 따라 더 정확하게 한반도의 겨울 기후를 예측하려면, 극지역의 기후를 이해하고 예측하는 시스템이 필요하다고 할 수 있다.

제 2 절. 연구개발의 목적

본 연구는 극지연구소의 “기후변화/기상재해 예측을 위한 극지 예측 시스템 (KPOPS)의 개발 및 활용 연구” 과제의 세부 위탁과제 “극지 기후 예측 성능 향상을 위한 미세 구름물리 모델 개발”이다. 연구개발의 핵심 목적은 차세대 구름수직접침 모수화(cloud overlap parameterization)가 적용된 전지구 기후모델을 이용하여 극지역의 기후를 예측하는 것이다. 제시된 연구목표를 달성하기 위해, 본 연구에서 설정한 연구의 세부목표는 아래와 같다.

① 구름수직접침 모수화가 탑재된 CAM5-UNICON을 이용한 극지기후 예측 시스템 구축
: 구름수직접침 모수화가 탑재된 전지구 기후모델인 CAM5-UNICON을 이용하여 극지기후를 예측할 수 있는 시스템을 구축하고, 이를 바탕으로 극지기후 예측 실험을 완료하는 것을 첫 번째 세부목표로 한다.

② CAM5-UNICON과 CAM4의 극지기후 예측 성능 비교

: (가)에서 제시된 첫 번째 세부목표에서 생산된 극지기후 예측 실험결과를 바탕으로 CAM4와 CAM5-UNICON의 극지기후 예측 성능을 정량적으로 평가하여 비교 및 분석하는 것을 두 번째 세부목표로 한다.

위에서 제시된 연구의 목적은 최종적으로 차세대 구름수직접침 모수화가 탑재된 CAM5-UNICON을 이용하여 극지기후 예측을 실시해보고, 이를 정량적으로 평가하는 것을 연구수행에 있어 평가의 착안점으로 두었다. 연구의 세부목표 당 가중치는 세부목표 (가)와 세부목표 (나) 모두 50%로 두어 연구를 실시했다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

Liang and Wang (1997), Morcrette and Jakob (2000), Barker et al. (2003), 그리고 Tompkins and Giuseppe (2007) 등의 수많은 모델링 연구에서 강수량과 복사 모의에 구름수직겹침이 상당한 영향을 미친다는 것이 밝혀져 왔다. 이를테면, 수직적으로 구름이 무작위로 겹쳐지는 상황에 비해 구름이 최대로 겹쳐지는 경우, 강수의 병합은 증가하고 강수의 증발은 감소하여 지표에서의 강수량은 크게 증가하게 된다. 이에 강수의 증발량 감소와 더불어 에어로졸의 재부유량 역시 감소하게 되고, 동일한 조건에서 구름 복사 강제력 또한 약해지게 된다. 이처럼 중요한 구름의 수직 최대 겹침과 무작위 겹침 정도를 특성화하기 위해, Hogan and Illingworth (2000) 는 다양한 관측 분석을 바탕으로 수직적으로 분리되어 있는 거리의 함수로써 역 지수 식을 제안했다. 이 식의 핵심 매개변수는 e-folding decorrelation length scale 로, Barker (2008) 와 Oreopoulos and Norris (2011) 등의 많은 후속 연구에 의해 단일 구름에 대한 상수 값이 아닌 구름마다 각각의 특성에 기반 하여 모수화 가능성이 알려졌다.

이러한 선행 연구들에 기반 하여 최근 Park et al. (2019b) 는 Park (2017, 2018) 과 Park et al. (2019a) 와 더불어 새로운 구름수직겹침 모수화 식을 제안 하였는데, 이는 적운의 기울어짐 정도를 고려하여 명시적으로 적운간의 수직겹침을 계산하고, 연직바람시어의 함수로 층운의 decorrelation length scale 을 정의하는 것을 기본 골조로 한다. Park 이 제안한 새로운 구름수직겹침의 구조는 다음과 같다.

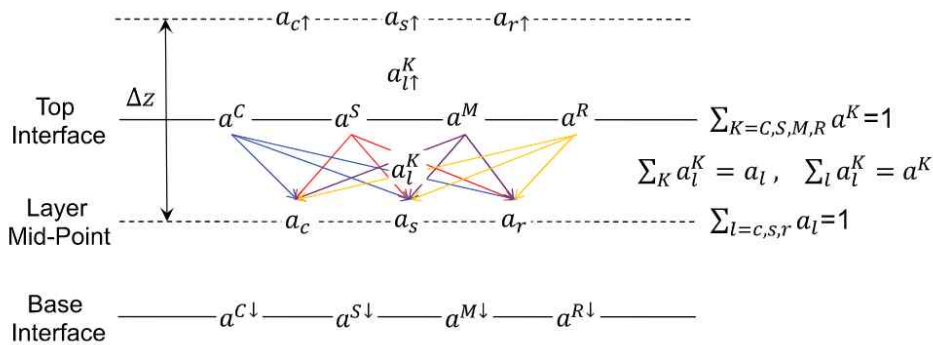


Figure 1. Diagram illustrating the vertical overlaps of cloud and radiation or precipitation areas. The variable a_l at the layer midpoint is the cloud fraction with $l = c$ (cumulus), s (stratus), and r (clear portion); a^K at the top interface is the radiation or precipitation area with $K = C$ (convective), S (stratiform), M (mixed), and R (clear portion); and a_l^K is the overlap area between the radiation or precipitation area at the top interface and the cloud fraction at the layer midpoint; and a_l^K is the overlap area between the radiation or precipitation area at the top interface and the cloud fraction in the layer above; and Δz is the vertical distance between two adjacent grid layers. Based on the consistency requirement, $\sum_K a^K = 1$, $\sum_l a_l = 1$, $\sum_K a_l^K = a_l$, and $\sum_l a_l^K = a^K$. The upward arrow denotes the value of the adjacent upper layer, while the downward arrow marks the value at the base interface. See the text for more details.

$$\begin{aligned}
m_c &= O(a_{c\uparrow}, a_c), \quad m_s = \min[\min(a_{s\uparrow}, a_s), 1 - P_c], \quad P_c = a_{c\uparrow} + a_c - m_c, \\
a_{c*} &= a_c - m_c, \quad a_{c\uparrow*} = a_{c\uparrow} - m_c, \quad a_{s*} = a_s - m_s, \quad a_{s\uparrow*} = a_{s\uparrow} - m_s, \\
\mu &= \frac{a_s}{a_s + a_r}, \quad \mu_* = \frac{a_{s*}}{a_{s*} + a_r}, \quad \mu_{\uparrow} = \frac{a_{s\uparrow}}{a_{s\uparrow} + a_{r\uparrow}}, \quad \mu_{\uparrow*} = \frac{a_{s\uparrow*}}{a_{s\uparrow*} + a_{r\uparrow}},
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
O(a_{c\uparrow}, a_c) &= m_c, \\
O(a_{s\uparrow}, a_c) &= \mu_{\uparrow*} \cdot a_{c*}, \\
O(a_{r\uparrow}, a_c) &= (1 - \mu_{\uparrow*}) \cdot a_{c*}, \\
O(a_{c\uparrow}, a_s) &= \mu_* \cdot a_{c\uparrow*}, \\
O(a_{s\uparrow}, a_s) &= m_s, \\
O(a_{r\uparrow}, a_s) &= a_{s*} - \mu_* \cdot a_{c\uparrow*}, \\
O(a_{c\uparrow}, a_r) &= (1 - \mu_*) \cdot a_{c\uparrow*}, \\
O(a_{s\uparrow}, a_r) &= a_{s\uparrow*} - \mu_{\uparrow*} \cdot a_{c*}, \\
O(a_{r\uparrow}, a_r) &= a_r - a_{s\uparrow*} + \mu_{\uparrow*} \cdot a_{c*} - (1 - \mu_*) \cdot a_{c\uparrow*},
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
O(a_{c\uparrow}, a_c) &= m_c, \\
O(a_{s\uparrow}, a_c) &= \mu_{\uparrow} \cdot a_{c*}, \\
O(a_{r\uparrow}, a_c) &= (1 - \mu_{\uparrow}) \cdot a_{c*}, \\
O(a_{c\uparrow}, a_s) &= \mu \cdot a_{c\uparrow*}, \\
O(a_{s\uparrow}, a_s) &= (a_{s\uparrow} - \mu_{\uparrow} \cdot a_{c*}) \cdot \mu, \\
O(a_{r\uparrow}, a_s) &= [a_{r\uparrow} - (1 - \mu_{\uparrow}) \cdot a_{c*}] \cdot \mu, \\
O(a_{c\uparrow}, a_r) &= (1 - \mu) \cdot a_{c\uparrow*}, \\
O(a_{s\uparrow}, a_r) &= (a_{s\uparrow} - \mu_{\uparrow} \cdot a_{c*}) \cdot (1 - \mu), \\
O(a_{r\uparrow}, a_r) &= [a_{r\uparrow} - (1 - \mu_{\uparrow}) \cdot a_{c*}] \cdot (1 - \mu),
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\alpha_l^K = O(a_{c\uparrow}, a_l) \cdot (a_{c\uparrow}^K / a_{c\uparrow}) + O(a_{s\uparrow}, a_l) \cdot (a_{s\uparrow}^K / a_{s\uparrow}) + O(a_{r\uparrow}, a_l) \cdot (a_{r\uparrow}^K / a_{r\uparrow}), \tag{4}$$

$$O(a_{m\uparrow}, a_l) = \lambda_s \cdot O(a_{m\uparrow}, a_l)_{\max,s} + (1 - \lambda_s) \cdot O(a_{m\uparrow}, a_l)_{\min,s}, \tag{5}$$

$$\lambda_s = \exp(-\Delta z / \Delta z_s), \tag{6}$$

$$\Delta z_s = \Delta z_0 - \gamma \cdot \frac{\sqrt{[u(z + \Delta z) - u(z)]^2 + [v(z + \Delta z) - v(z)]^2}}{\Delta z}, \tag{7}$$

제 3 장 연구개발 방법 및 세부목표

제 1 절. 연구방법

본 연구에서는 전지구 순환모델을 사용하여 sub-seasonal timescale에서 기후예측 시스템을 구축하고, 이 시스템의 performance를 평가하는 것을 연구목표로 삼았다.

위 연구목적에 따라, 우선 전지구 모델을 사용하여 극지기후 예측 시스템을 구축하였다. 전지구 모형으로는 NCAR (National Center for Atmospheric Research)의 CAM4와, CAM5에 차세대 구름꺾침 모수화가 탑재된 CAM5-UNICON, 이렇게 2가지를 사용하였다. 극지역 기후의 예측은 initial time으로부터 시작하여 모델을 사용하여 최대 4달 동안 적분하였다. 이때, 총 15개의 ensemble member를 만들어 모델 적분을 한 뒤 이를 평균하는 방법을 사용하였다. 이때 각 ensemble member들은 모델 적분을 시작하는 initial condition에 perturbation을 주는 방식으로 만들어졌다.

극지 기후의 예측은 각 연도의 10월 1일로부터 예측을 시작하여 11~12월을 예측하는 early winter forecast과 각 연도의 12월 1일로부터 예측을 시작하여 1~2월을 예측하는 late winter forecast로 나누어 실시했다. 예측을 위해 사용한 initial time은 2001년부터 2015년까지 총 15연도의 10월 1일 및 12월 1일로, 이를 바탕으로 겨울 극지 기후 예측을 실시했다.

앞서 설명한 모델적분 방식에 의하여 예측한 극지 기후 예측이 유의미한 예측인지 평가하고 CAM4 및 CAM5-UNICON 간 예측을 비교해보기 위해, 본 연구에서는 예측결과와 동일한 기간의 관측자료를 바탕으로 비교했다. 비교분석에 사용한 관측자료는 유럽의 중기기상예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 생산한 재분석 자료인 ERA-Interim reanalysis (Dee et al., 2011)를 사용했다.

제 2 절 연구 세부목표 및 구체적인 수행방법

연구 세부목표에 따른 연구수행방법 및 구체적인 내용은 아래의 표에 정리되어 있다.

성과목표	구름수직접침 모수화가 탑재된 CAM5-UNICON을 이용한 극지 기후 예측 시스템 구축	
세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
구름수직접침 모수화가 탑재된 CAM5-UNICON을 이용한 극지기후예측 시스템을 구축함	구름수직접침 모수화를 CAM5-UNICON의 관련 물리모수화 방안에 이식	구름수직접침 모수화를 적은 및 층운 모수화방안에 이식
	구름수직접침 모수화가 탑재된 CAM5-UNICON을 이용하여 디버깅 및 기본 테스트 시뮬레이션 진행	Single-column 모수화를 이용한 디버깅 진행 및 전지구 에너지 밸런스를 맞추기 위한 tuning 시뮬레이션 진행
시뮬레이션을 돌려 CAM5-UNICON과 CAM4의 극지기후 예측 성능을 비교	극지에서 사용하는 계절예측 프로토콜에 맞추어서 실제 계절예측 시뮬레이션 수행	극지 표준 계절예측 조건에 맞추어서 구름수직접침 모수화가 탑재된 CAM5-UNICON을 이용하여 Ensemble simulation 진행
	시뮬레이션 결과를 CAM4와 비교	위에서 수행된 시뮬레이션결과를 CAM4의 시뮬레이션결과와 비교분석 진행

표 1. 연구 세부목표에 따른 연구수행방법 및 구체적인 내용

제 4 장 연구개발수행 내용 및 결과

본 연구에서는 CAM4 및 CAM5-UNICON을 이용하여 예측한 극지기후와 실제 극지기후를 비교하여, 본 연구에서 적용한 극지기후 예측 시스템이 어떠한 성능을 가지는 지 확인해보았다. 극지기후의 예측은 제 3 장에서 설명한 방법을 바탕으로 15년 동안의 early winter 및 late winter를 5 / 10 / 15개의 ensemble member를 이용하였으며, 이와 비교할 실제 극지기후로는 ECMWF에서 생산한 재분석 자료를 사용하였다. 극지 기후를 나타내는 다양한 기상 변수들 중, 2m에서의 온도(2m-air temperature, T2M)를 바탕으로 모델을 이용한 예측을 정량적으로 평가했다.

제 1 절. 연구결과 (1) - climatology 분석

제 1 절에서는 ERA-Interim 재분석 자료에서 나타난 극지역의 early winter 및 late winter의 T2M climatology와 CAM4 및 CAM5-UNICON을 이용하여 예측한 T2M climatology를 비교해보았다. climatology 분석에 사용한 기간은 2001/2002년부터 2015/2016년의 early winter 및 late winter 전체이다.

① prediction bias in early winter

early winter의 예측을 살펴보면, 전반적으로 CAM4 및 CAM5-UNICON에서 모의한 예측결과의 오차가 유사한 패턴을 가짐을 확인할 수 있었다. 그러나 예측오차는 CAM5-UNICON에서 더 크게 나타났으며, 특히 북극해에서 그 정도가 컸다. CAM5-UNICON은 위도 50도 이상의 지역에서 대부분 음의 T2M anomaly를 가지고 있었다. 이는 CAM5-UNICON을 통해 예측한 평균 극지기후가 실제에 비해 조금 더 차갑게 모의되었음을 나타낸다. cold bias가 나타나는 지역은 특히 북시베리아 및 북미지역의 북쪽에서 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 달리, 북미지역의 허드슨 만 및 베링해와 북극해 사이의 해협에서는 약한 양의 anomaly가 나타났으나 앞서 살펴본 음의 anomaly에 비해서는 크기가 비교적 작았다.

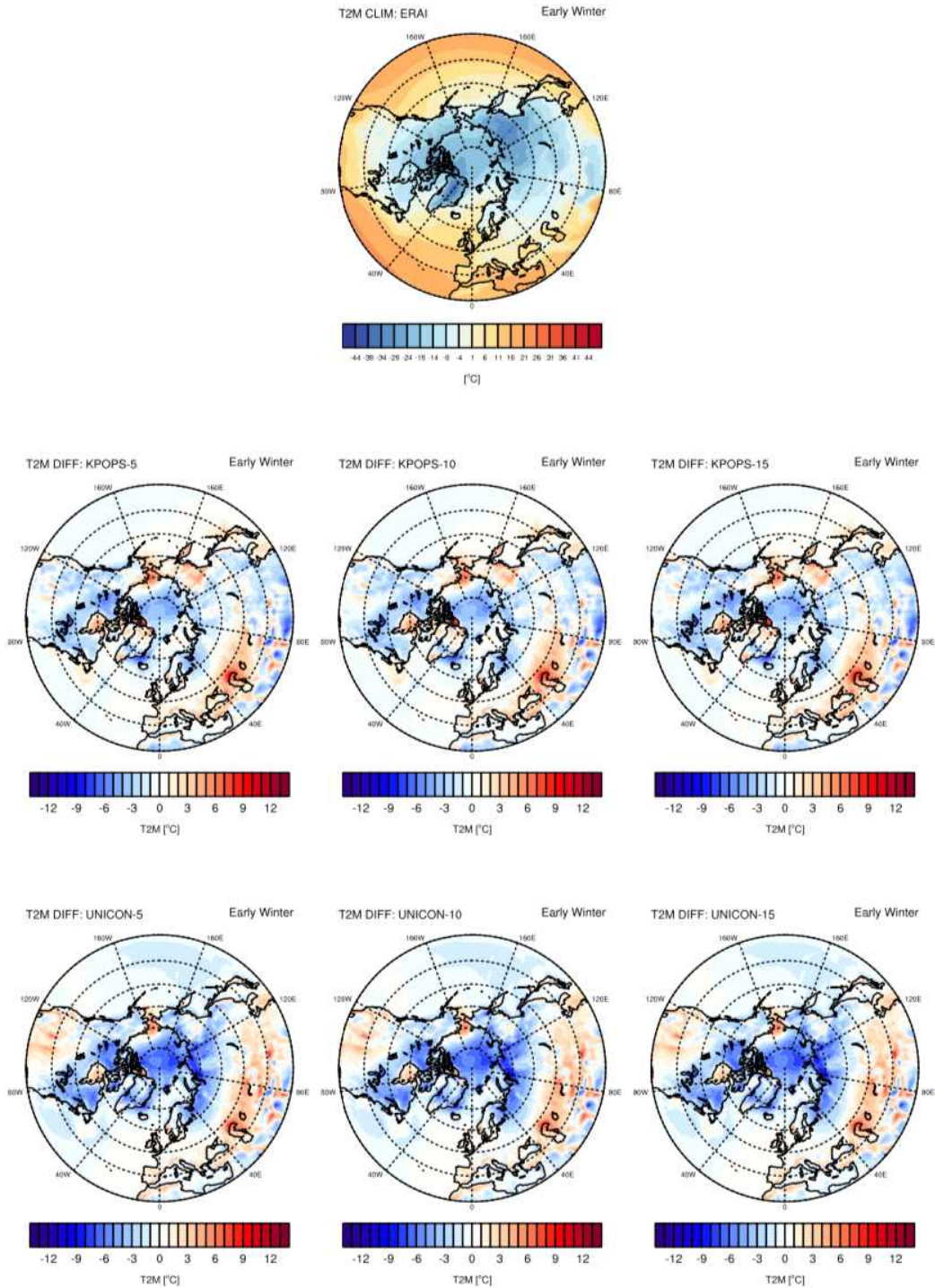


그림 1. T2M climatology and anomaly in early winter

② prediction bias in late winter

late winter 또한 early winter와 비슷한 패턴을 보여주었다. CAM4와 CAM5-UNICON 모두 북극해 주변에서 cold bias를 보여주었으며, 그 정도는 CAM5-UNICON에서 더 강했다.

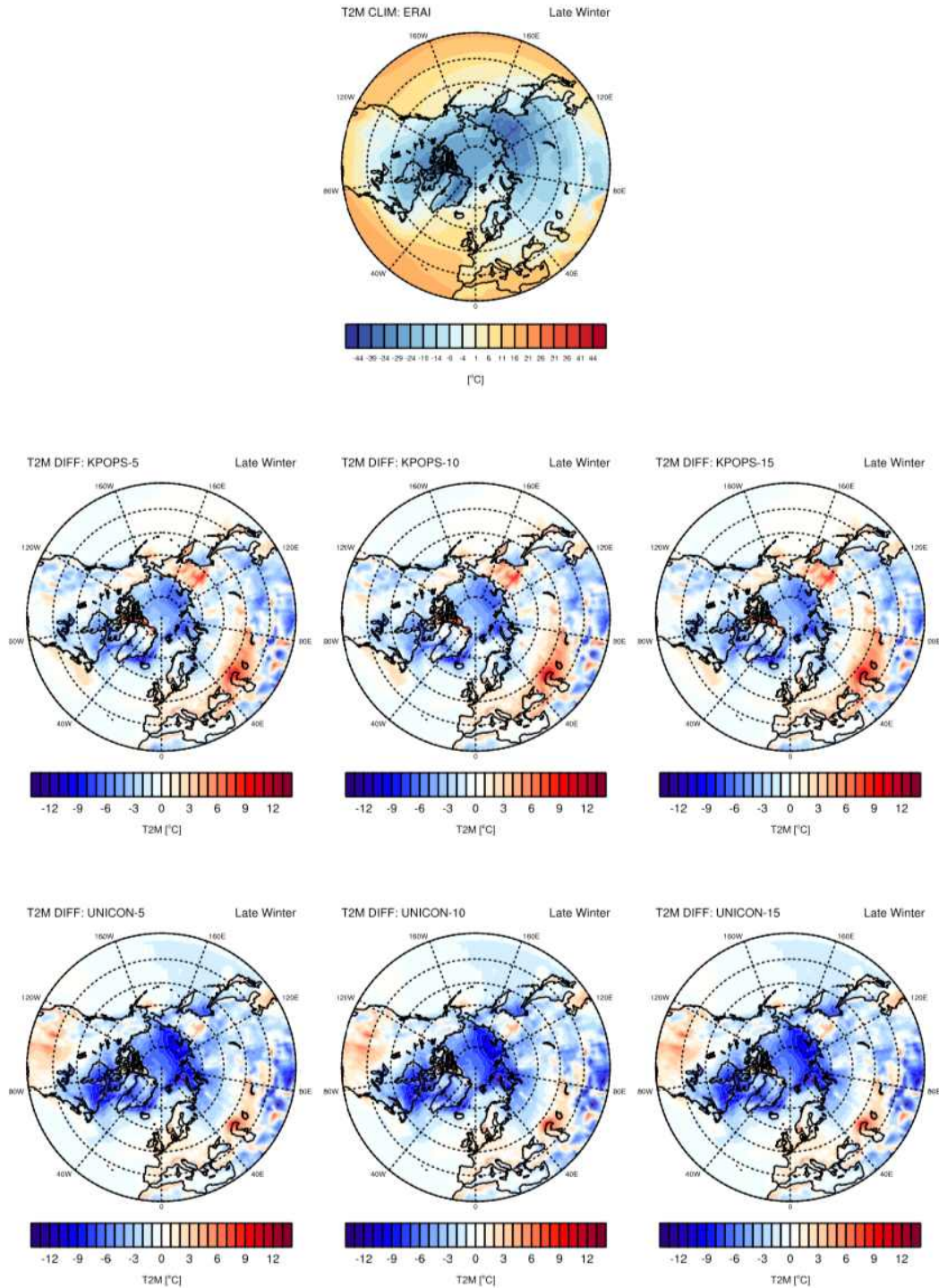


그림 2. T2M climatology and anomaly in late winter

제 2 절. 연구결과 (2) - trend 분석

제 2 절에서는 CAM4 및 CAM5-UNICON simulation 결과 및 ERA-Interim reanalysis data에서 나타난 T2M의 trend (단위 : °C/year)를 비교해보았다.

① T2M trend in early winter

ERA-Interim에서 나타난 early winter 계절의 T2M trend를 살펴보면, 북아메리카의 내륙 및 그린란드 지역에서의 T2M trend는 음의 값을 가지며 그 외의 지역에서는 대부분 양의 trend를 가진다. 북극해 중심에서도 주변에 비해 약하지만 음의 trend를 보여준다.

CAM4 및 CAM5-UNICON에서 나타난 극지에서의 early winter T2M trend는 시베리아 북부지역을 중심으로 강한 양의 trend를 보여주었다. 이러한 양의 trend는 북위 75도 이상에서 주로 나타났고, 그보다 저위도의 지역은 약한 양과 음의 값이 혼재한다. 북아메리카의 내륙 및 그린란드 지역에서 ERA-Interim data이 음의 T2M trend를 보여준 것과는 달리, CAM5-UNICON은 반대로 양의 T2M trend를 보여주었다. 이러한 CAM5-UNICON에서 모의한 late winter T2M trend는 early winter trend와 비슷하게 대부분의 지역에서 양의 값을 보여주었다. 그린란드 지역만이 early winter에 비해 더 강한 late winter cold trend를 보여주었다. ERA-Interim에서 나타난 early winter과 late winter의 T2M trend의 중심이 시베리아 북부와 북극해 중심으로 계절에 따라 다른 것과는 다른 점이었다.

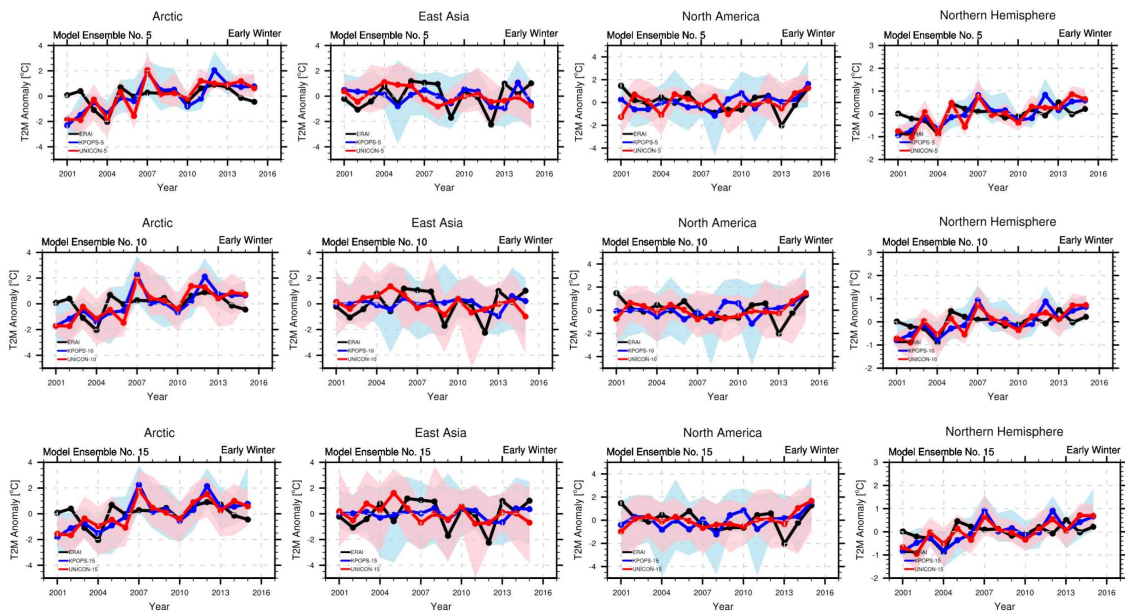


그림 3. Area-averaged timeseries of early winter T2M

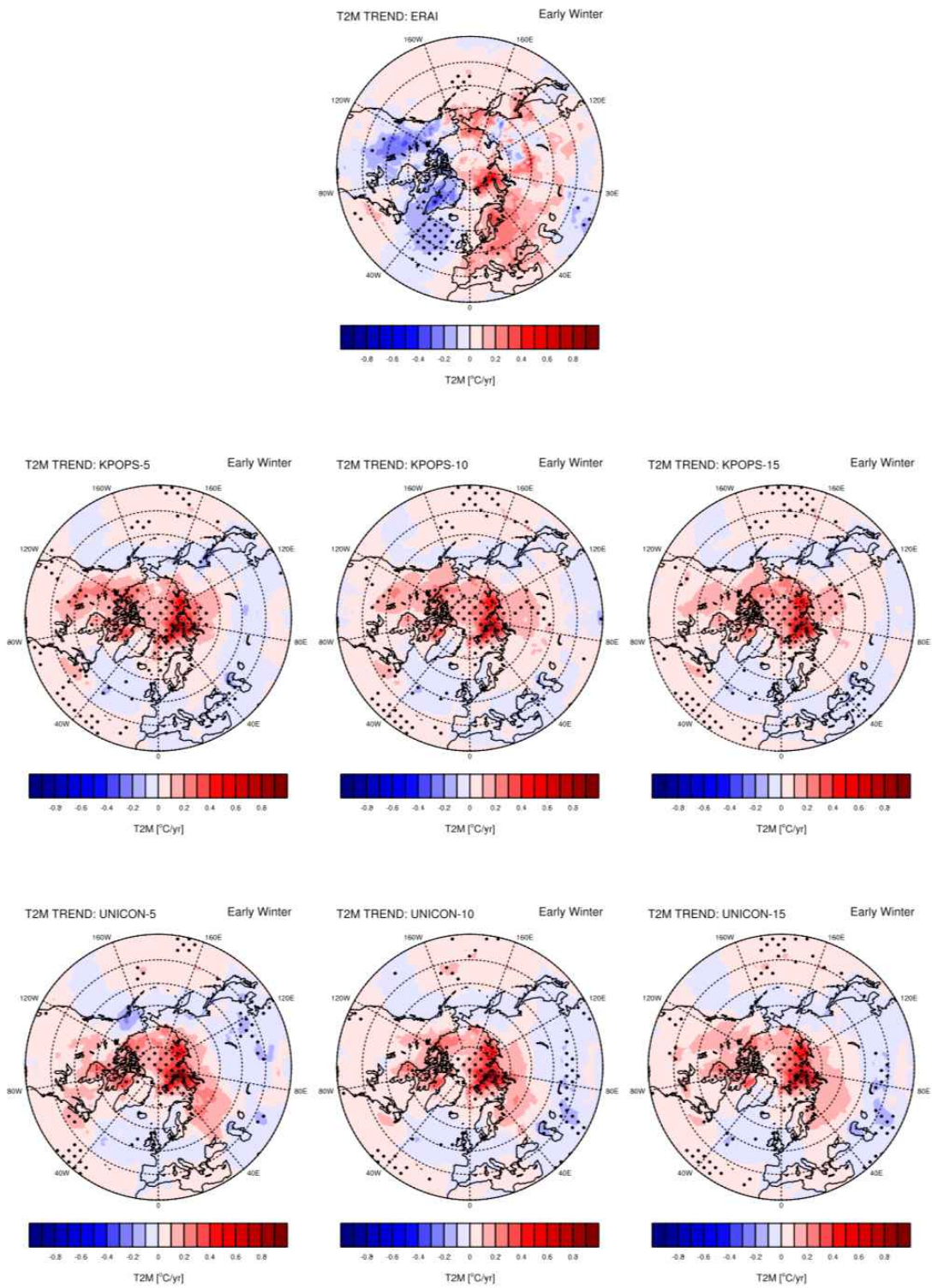


그림 4. T2M trend of early winter

② T2M trend in late winter

ERA-Interim에서 나타난 late winter 계절의 T2M trend를 살펴보면, 북극해 중심으로 강한 양의 trend를 보여주며 이러한 증가량은 북위 70도 미만의 대륙에서는 음의 trend를 보여준다. 이는 분석기간 동안 북극해를 중심으로 한 극지역의 평균 T2M은 증가했지만 이와 반대로 아시아 및 북아메리카 내륙의 평균 T2M은 감소함을 뜻한다.

CAM4 및 CAM5-UNICON에서 예측한 결과 또한 북극해 지역에서의 late winter T2M trend가 양수로 나와 ERA-Interim과 비슷한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 이러한 양의 trend는 ERA-Interim에서 나타난 약 0.6 전후의 값보다는 다소 약한 0.3 전후의 값이었다. 북위 70도 미만의 대륙에서는 ERA-Interim에서 음의 trend가 나타난 것과는 CAM5-UNICON에서는 반대로 약한 양의 trend를 확인할 수 있었다. 또한 그린란드 지역만이 early winter에 비해 더 강한 late winter cold trend를 보여주었다. ERA-Interim에서 나타난 early winter와 late winter의 T2M trend의 중심이 시베리아 북부와 북극해 중심으로 계절에 따라 다른 것과는 다른 점이였다.

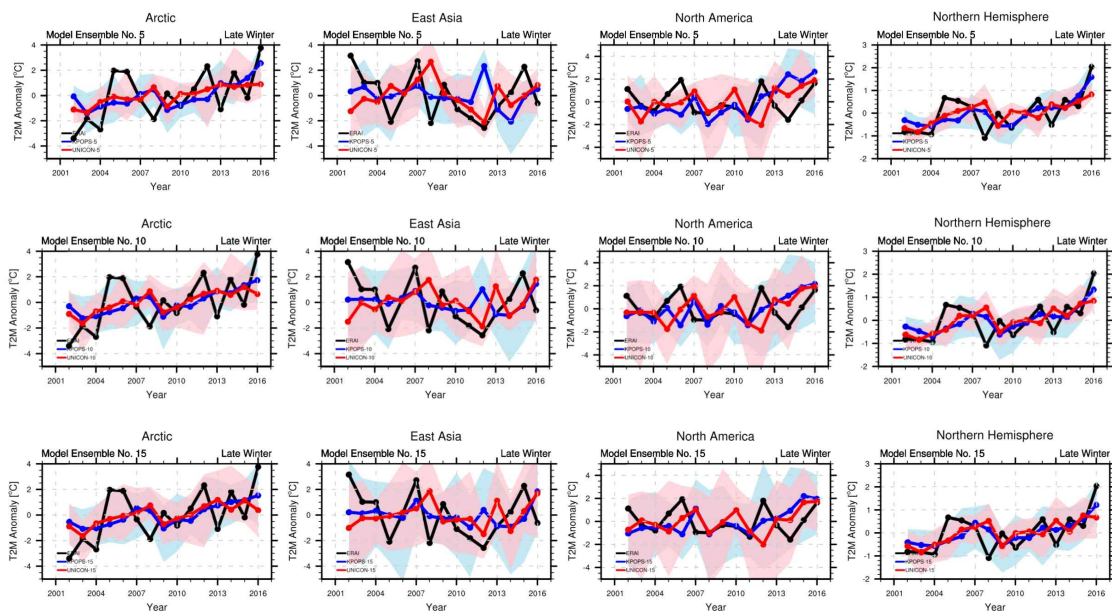


그림 5. Area-averaged timeseries of late winter T2M

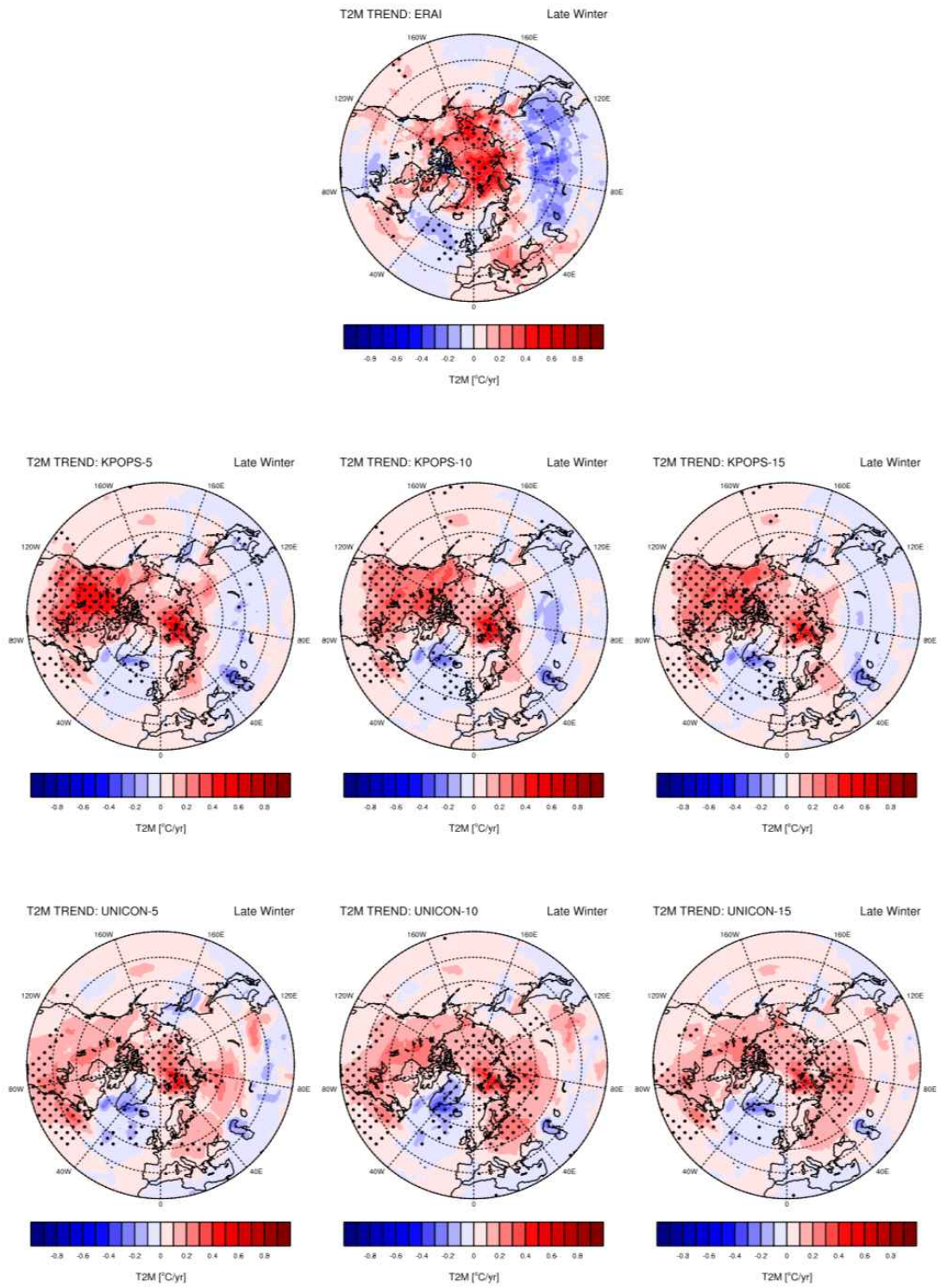


그림 6. T2M trend of late winter

제 3 절. 연구결과 (3) - ACC 분석

제 3 절에서는 CAM4 및 CAM5-UNICON simulation 결과가 ERA-Interim reanalysis data와 얼마나 유사한 지 비교해보기 위해, 두 자료에서 나타난 ACC (Anomaly Correlation Coefficients)를 계산했다. 신뢰수준 90% 이상의 통계적 유의미를 가진 자료는 점으로 따로 표시했으며, ACC의 정의는 아래와 같다. 본 연구와 유사하게 ACC를 사용하여 CMIP5 model들의 sub-seasonal near-surface air temperature prediction을 정량적으로 비교한 선행연구인 Choi et al. (2016)에서는 예측결과의 ACC가 0.5 ~ 0.7보다 큰 경우에 예측결과가 유의미하다고 제시되었다. 이에 따라 본 연구에서는 ACC가 0.5보다 크게 나온 예측에 대하여 실제 극지 기후 예측에 성공했다고 판단하여 극지기후 예측의 평가를 진행하였다.

$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^N w_i (f_i - \bar{f})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N w_i (f_i - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^N w_i (o_i - \bar{o})^2}}$$

우선 CAM4 및 CAM5-UNICON ensemble member의 수를 5 / 10 / 15개로 달리해서 예측했을 때, 통계적으로 유의미한 결과를 확인할 수 있는 지역과 그 correlation의 값이 early winter 예측 및 late winter 예측 모두에서 증가했다. 이는 더 많은 ensemble member를 사용한 예측의 성능이 ACC 측면에서 더 좋았다는 것을 뜻한다. 비록 5개의 member를 사용한 예측의 ACC가 통계적 유의도가 낮게 나왔지만, 10개 및 15개의 member를 사용한 예측과 전체적인 패턴은 유사했다.

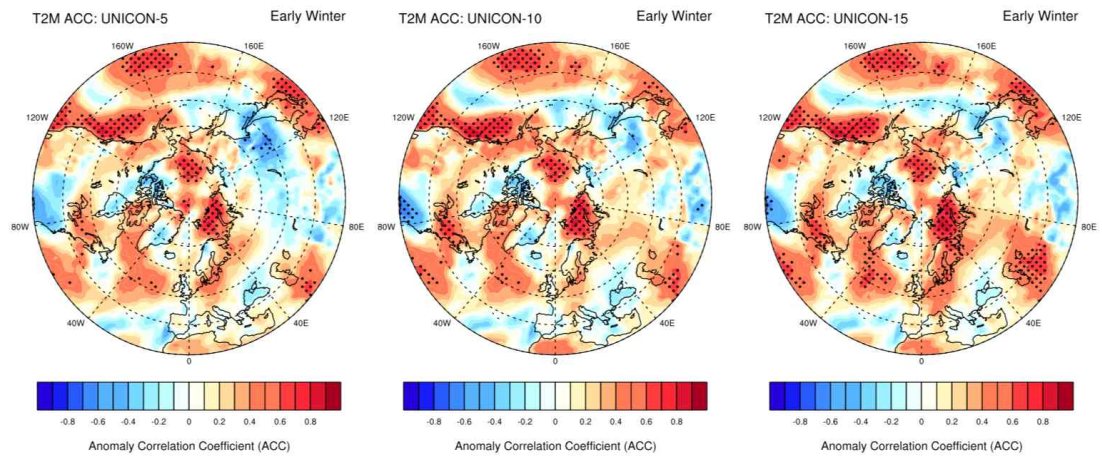


그림 7. T2M ACC in early winter

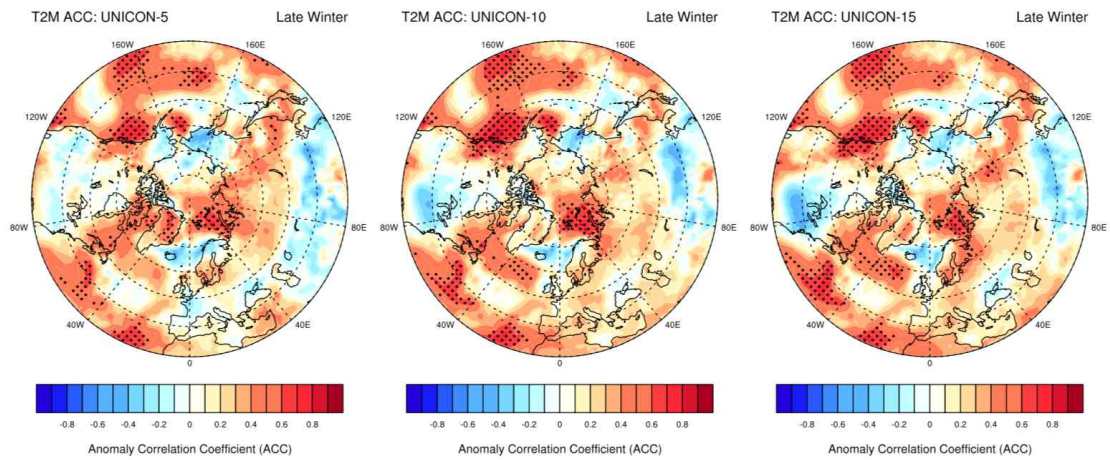


그림 8. T2M ACC in late winter

제 4 절. 연구결과 (4) - MSSS 분석

제 4 절에서는 Goddard et al. (2013)에서 예측의 성능을 정량적으로 평가하기 위해 제시된 통계치인 MSSS(Mean-Squared Skill Score)를 이용하여 CAM5-UNICON의 극지의 T2M 예측성을 평가해보았다.

MSSS는 1에서 관측 climatology의 변동성으로 normalize한 모델 예측결과들의 관측에 대한 mean squared error의 값을 뺀 것으로, MSSS의 정의는 아래와 같다. 본 연구와 유사한 목적을 가진 Choi et al. (2016)에 따르면, MSSS가 0.0보다 높은 prediction이 의미가 있는 prediction이라고 제시되었다. MSSS가 0.0보다 낮은 예측이란 예측으로 인한 에러(MSE_j)가 관측에 존재하고 있는 불확실성(MSE_{o_j})보다 큰 경우라고 할 수 있으며, 이는 일반적으로 유의하지 않은 예측결과라고 볼 수 있다.

$$MSSS = 1 - \frac{\sum_j MSE_j}{\sum_j MSE_{o_j}} \quad (MSSS_j = 1 - \frac{MSE_j}{MSE_{o_j}})$$
$$(MSE_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} - o_{ij})^2, \quad MSE_{o_j} = (\frac{n}{n-1}) s_{o_j}^2, \quad s_{o_j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_{ij} - \bar{o}_j)^2)$$

극지연구소

① MSSS in early winter

앞서 제시된 바와 같이, 예측 유의미성의 평가 기준으로 MSSS가 0.0보다 큰, 즉 MSSS값이 양수인지 여부로 설정하였기 때문에 아래의 그림에서 붉은 계통의 색을 보여주는 지역의 예측이 모델이 유의미하게 예측했다고 볼 수 있다. CAM4/CAM5-UNICON에서 예측한 early winter T2M은 지역별로 다른 예측성을 보여주는데, 서시베리아 부근의 북극해 일부와 북아메리카 동안을 제외하고는 좋은 예측성을 보여주지 못했다. 특히 북극해 동경 120도 부근에는 강한 음의 값을 가짐을 확인할 수 있어, early winter 예측의 오차가 실제 관측치의 변동에 비해 다소 큰 것을 확인할 수 있었다.

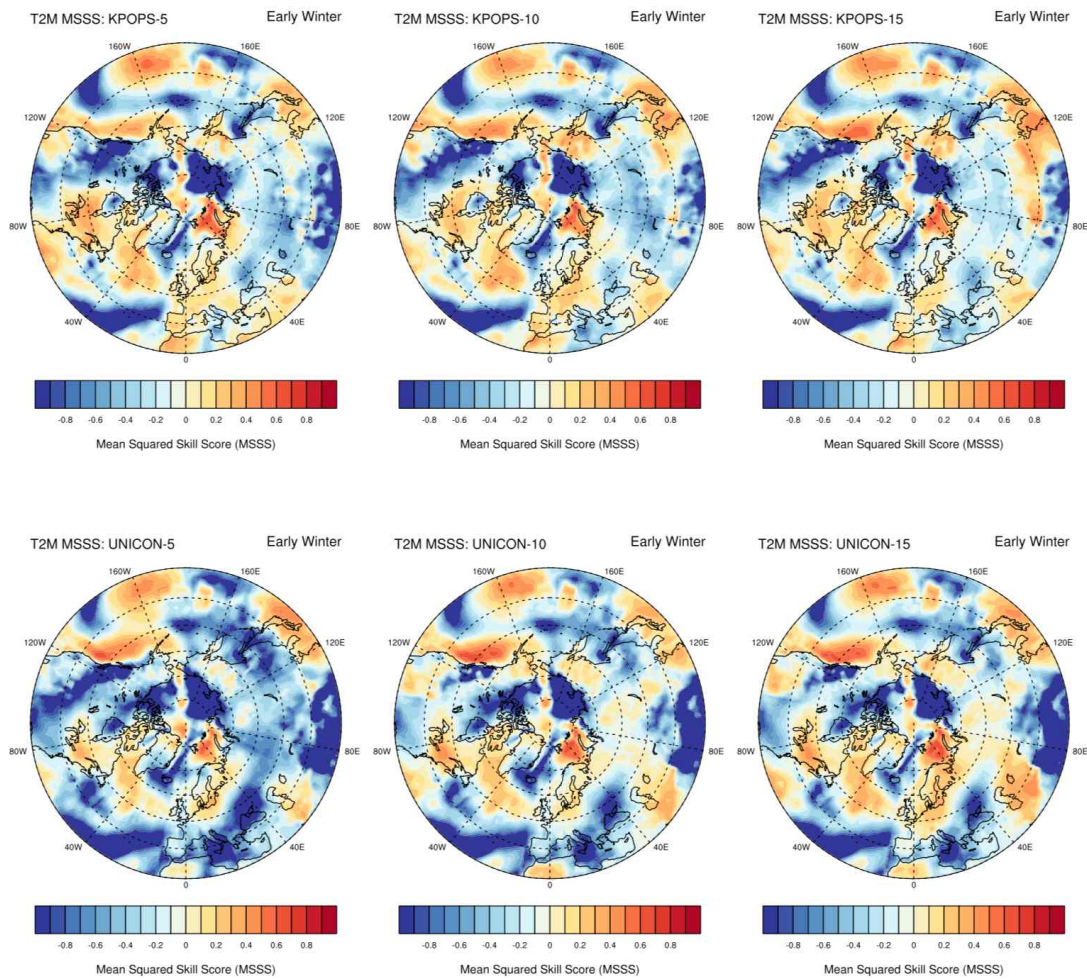


그림 9. T2M MSSS in early winter

② MSSS in late winter

앞서 CAM4/CAM5-UNICON가 극지역의 early winter T2M을 잘 예측하지 못한 것과는 대조적으로 late winter의 경우, 극지역의 많은 부분이 음수 MSSS에서 양수 MSSS로 바뀔 수 있었다. 특히 early winter에서 큰 음의 MSSS 결과를 보여주며 예측에 크게 실패한 북극해 동경 120도 부근에서, late winter 예측은 비교적 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 여전히 북아메리카 지역과 그린란드 동안 해양은 음의 MSSS값을 가짐을 확인할 수 있다.

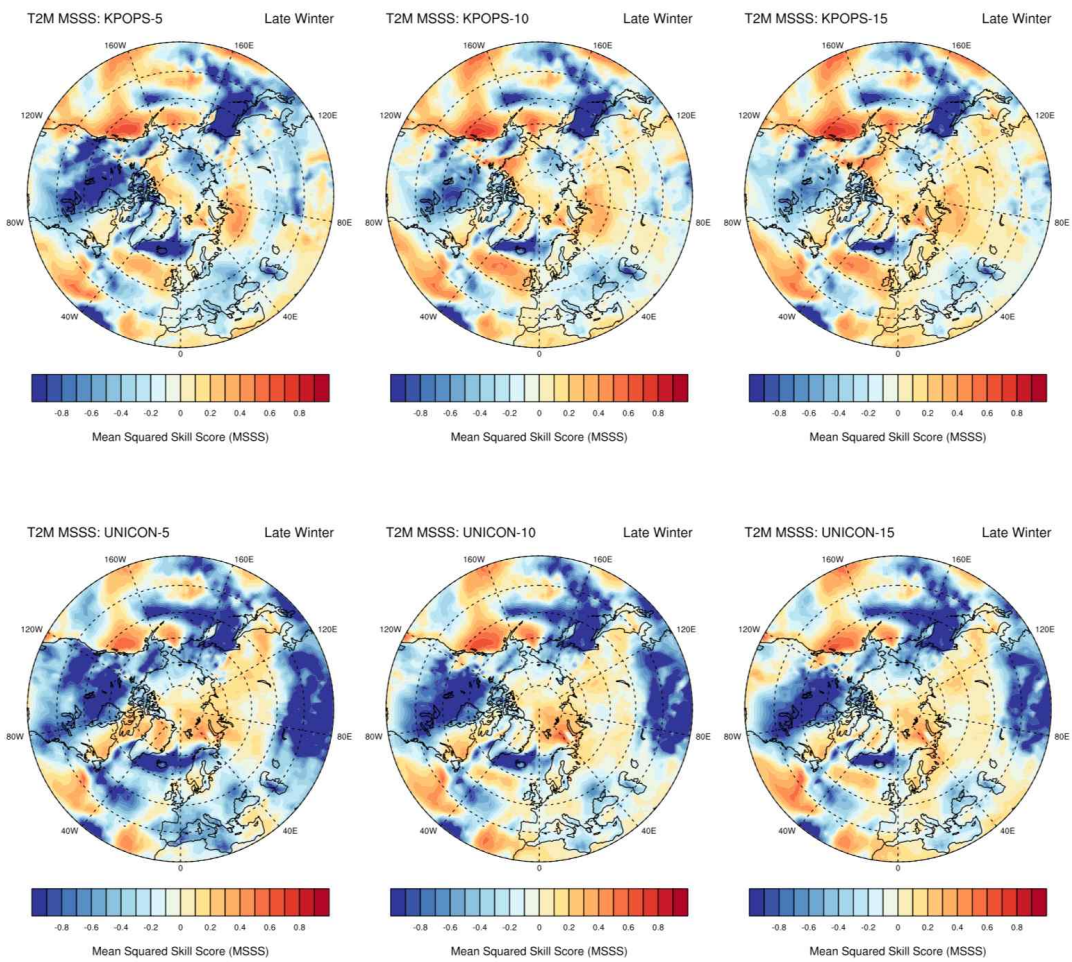


그림 10. T2M MSSS in early winter

제 5 절. 연구결과 (5) - timeseries 분석

CAM5-UNICON을 이용한 모의결과의 timeseries가 ERA-Interim에서 모의된 것과 유사한 지 확인해보고자, 지역별 평균 T2M의 timeseries correlation coefficient (R)을 평가해보았다.

① Correlation coefficients by ensembles and areas

아래의 그래프는 ERA-Interim 재분석 자료 및 CAM5-UNICON에서 모의된 지역별 평균 T2M의 timeseries의 correlation coefficient를 나타낸다. 극지역에서 CAM5-UNICON가 예측한 early winter T2M의 R은 0.4 ~ 0.5 사이의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이 수치는 다른 지역에 비해 비교적 높은 것이다. 특이한 점으로는 CAM5-UNICON의 ensemble member의 수를 증가시켜도 예측 성능은 크게 보완되지 않음을 확인할 수 있다. CAM5-UNICON은 early winter에 비해 late winter의 T2M R은 0.2 ~ 0.4 사이의 값으로 비교적 낮음을 확인할 수 있었다. late winter의 경우, ensemble member의 수를 증가시킬수록 예측 성능이 점진적으로 향상됨을 확인할 수 있었다.

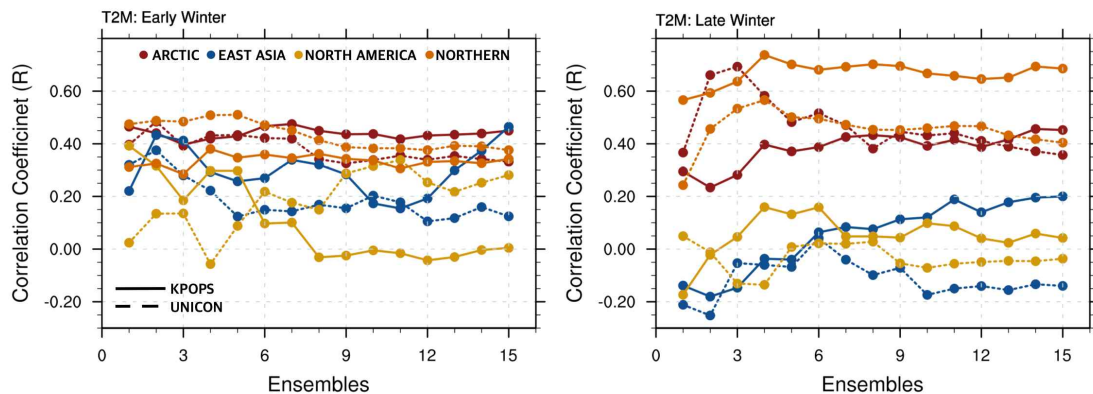


그림 11. T2M timeseries correlation coefficients by ensembles and areas

② daily timeseries of ACC

아래의 그래프들은 CAM5-UNICON에서 모의한 T2M 예측 결과의 ACC (Anomaly Correlation Coefficients) 값을 예측 기간에 따라 나타낸 결과이다. 그래프에서는 전지구 모형을 사용하여 적분한 뒤, 1달 이후의 결과를 보여주고 있다.

CAM5-UNICON은 early winter T2M 예측은 시간에 따라 그 정확도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 특히 예측을 시작한 지 약 2달 이후에는 대부분의 지역에서 ACC의 값이 의미가 없는 수준의 결과가 나옴을 확인할 수 있었다.

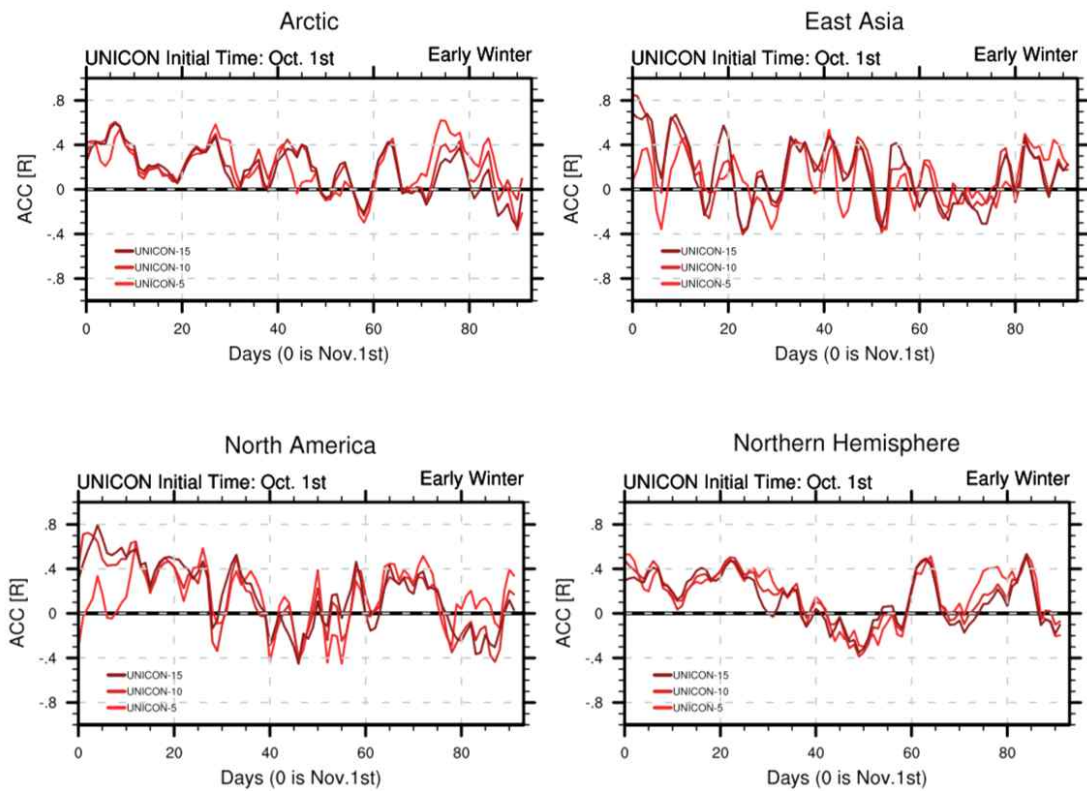


그림 12. timeseries of daily ACC in early winter (CAM5-UNICON)

③ daily timeseries of MSSS

아래의 그래프들은 CAM5-UNICON에서 모의한 T2M 예측 결과의 MSSS (Mean-Squared Skill Score) 값을 예측 기간에 따라 나타낸 결과이다. 그래프에서는 전지구 모형을 사용하여 적분한 뒤, 1달 이후의 결과를 보여주고 있다. 앞서 제시된 바와 같이 MSSS가 양수인 예측이 유의미한 예측이라고 평가의 기준으로 설정하여 모델들의 극지기후 예측성능을 지역별로 평가했다.

CAM5-UNICON은 early winter T2M 예측은 t시간에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 극지역에서의 CAM5-UNICON에서의 예측값은 MSSS값은 $-1 \sim 0$ 사이를 보여주는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 아직 극지기후 예측이 예측 전 기간에 대하여 불확실함을 보여준다. 이러한 결과는 앞서, 여러 분석을 통해 확인한 바와 유사하다. 이러한 early winter 예측의 불확실성은 극지역 뿐 아니라 동아시아와 북아메리카를 포함한 북반구 예측에서 나타난다.

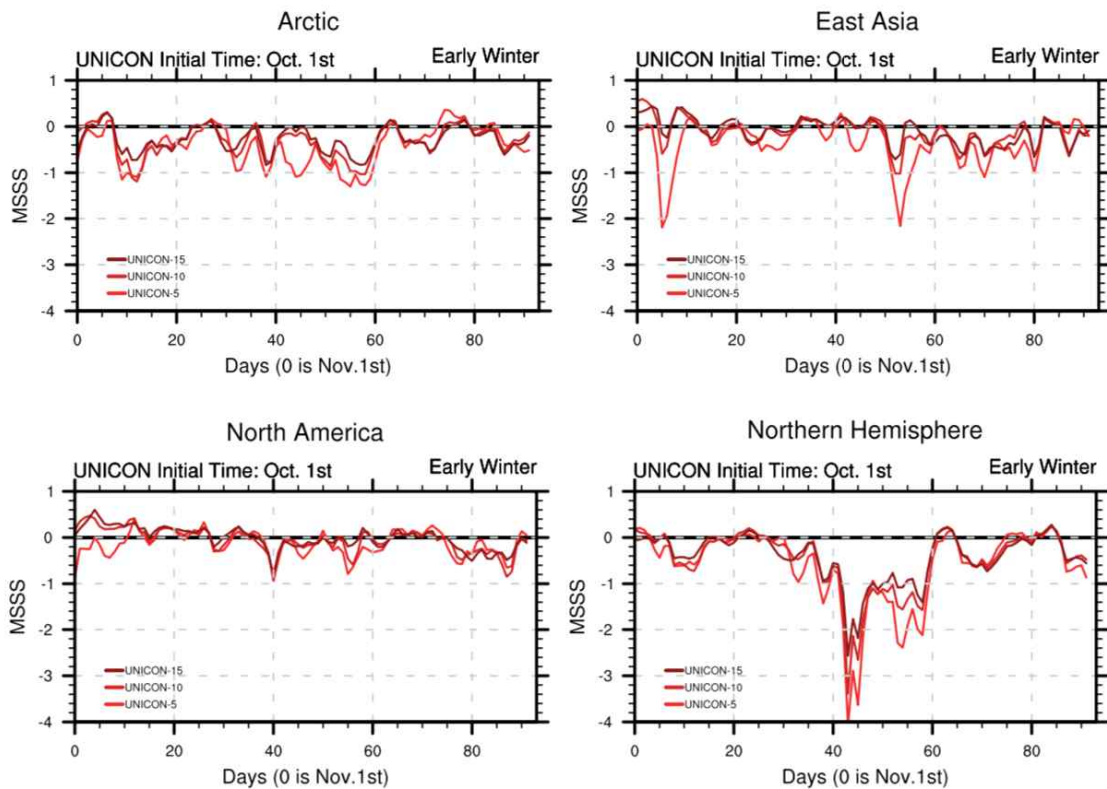


그림 13. timeseries of daily MSSS in early winter (CAM5-UNICON)

CAM5-UNICON은 late winter T2M 예측 또한 모델 적분시간에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 극지역에서의 CAM5-UNICON에서의 예측값은 MSSS값은 예측 시작한 뒤 30일 후에는 약 0.8이지만 40일 이후부터는 거의 0에 근접한 값이 지속되었다. 이는 예측 40일 전후로 late winter 극지기후의 예측성이 크게 감소함을 제시한다. 처음으로 MSSS가 음수가 되는 모델적분 기간이 극지에서는 약 40일, 동아시아에서는 약 42일, 북아메리카에서는 약 45일, 북반구에서는 약 45일로 북반구 전반적으로 40~45일 사이에 예측성이 급격하게 감소함을 확인할 수 있다.

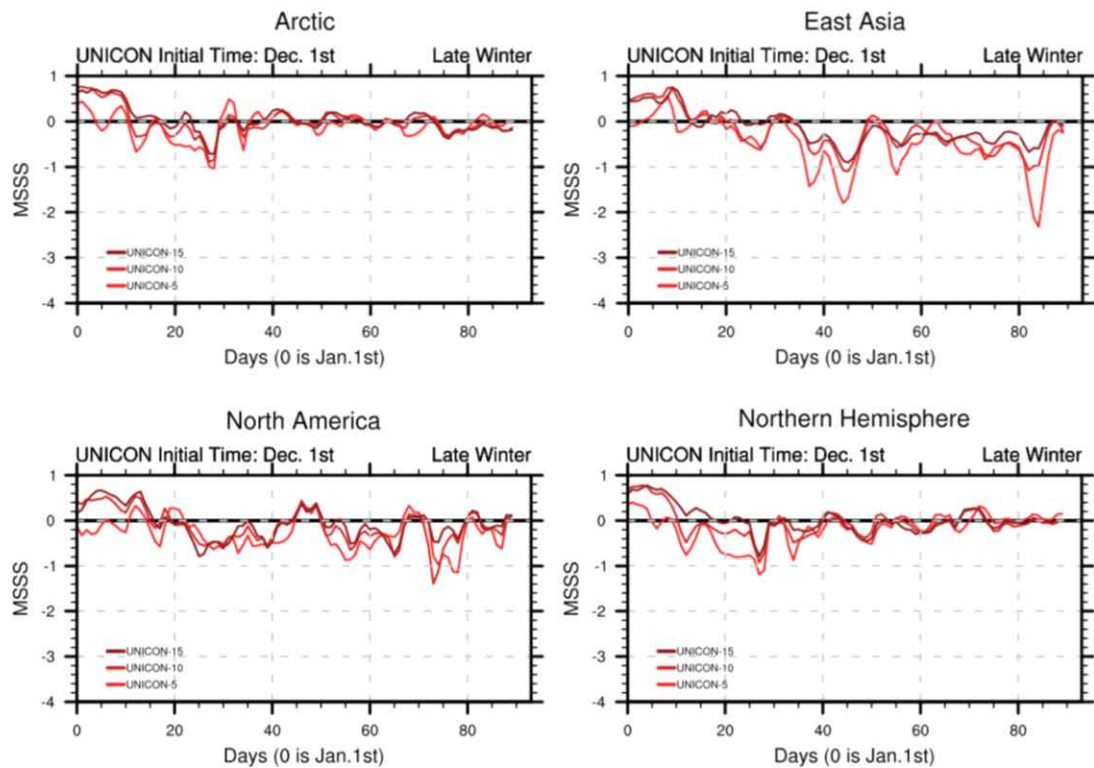


그림 14. timeseries of daily MSSS in late winter (CAM5-UNICON)

early winter과 late winter 극지기후 예측 모두 ensemble member의 수를 높일수록 더 좋은 예측이 되었는데, 그 차이는 ensemble member를 2~3배 증가시킨 것에 비해 크게 개선되지 않았다.

제 6 절. 연구결과 (6) - ART indices 분석

본 연구에서는 Kug et al. (2015)에서 제시된 ART (ARctic Temperature) indices를 이용하여, CAM4 및 CAM5-UNICON의 극지기후 모의성능을 평가해보았다. ART indices는 극지기후를 잘 대변하는 지역의 T2M을 지수화한 것으로, Kug et al. (2015)에서 제시된 두 지역에 따라 ART-1 index와 ART-2 index로 나뉜다.

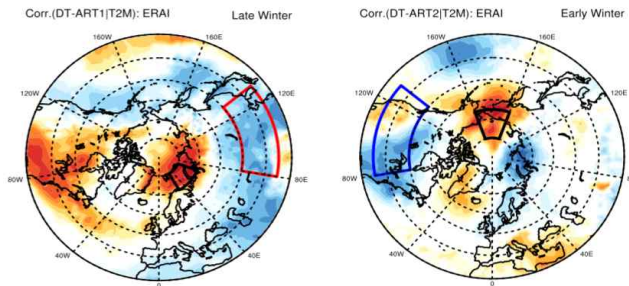


그림 15. ART-1 및 ART-2 지수에 사용되는 지역

CAM4와 CAM5-UNICON 모두 ensemble member 수에 따른 ART indices의 예측변동성은 크지 않았다. 이는 앞서 climatology 분석에서 나온 바와 같이, T2M의 climatology 예측이 ensemble member 수에 크게 민감하지 않음을 뜻한다.

early winter에서의 ART-1 index 예측은 CAM4와 CAM5-UNICON이 비슷한 결과를 보여주었으나 ART-2 index 예측은 CAM5-UNICON이 ART-2 index의 변동성을 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. CAM4의 경우, ART-2 index의 변화폭이 ERA-Interim에서의 변화폭보다 크게 작음을 확인할 수 있었다. 다만 2007년 이후의 예측에 대해서는 CAM4와 CAM5-UNICON 모두 2014년의 peak를 제외하고는 잘 모의하지 못함을 확인할 수 있었다.

early winter과 마찬가지로 late winter에서의 ART-1 index 예측은 CAM4와 CAM5-UNICON가 비슷한 결과를 보여주었다. 두 예측 모두 ERAI에서 나타난 ART-1 index의 극값을 잘 모의하지 못했는데, 특히 2004년, 2005년, 2012년, 그리고 2015년에 ERA-Interim에서 나온 것과는 전혀 다른 결과를 보여주었다. ART-2 index 예측 또한 2010년에서 2013년 사이의 패턴을 제외하고는 전반적으로 예측에 성공하지 못한 것을 확인할 수 있었다.

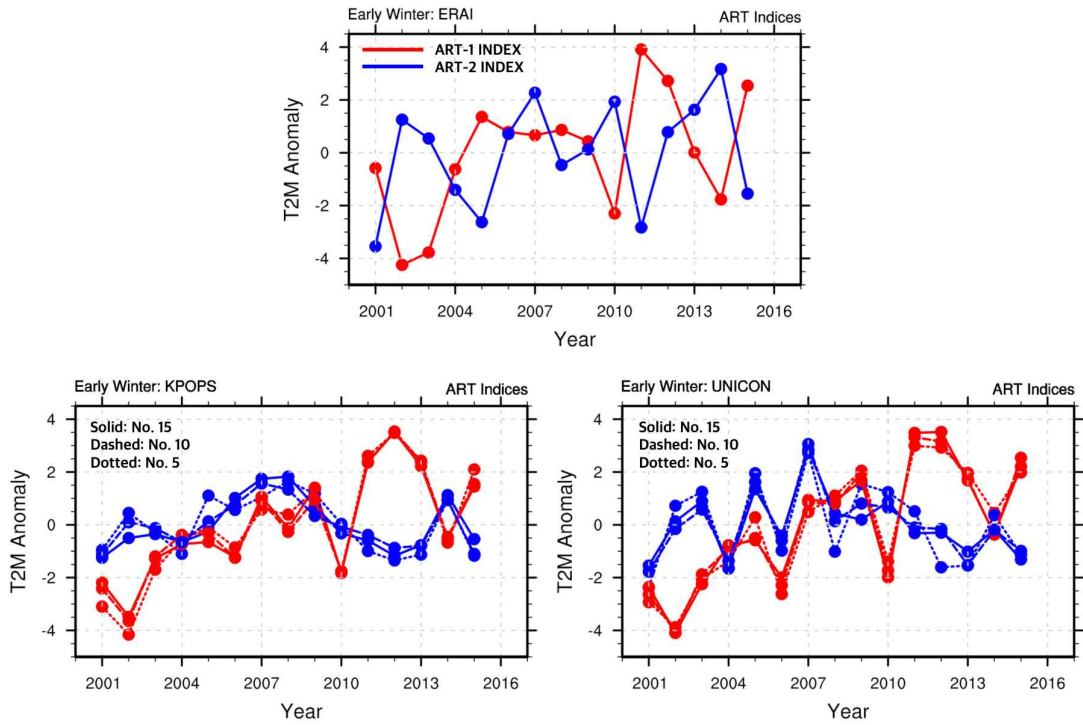


그림 16. T2M anomaly of ART indices in early winter

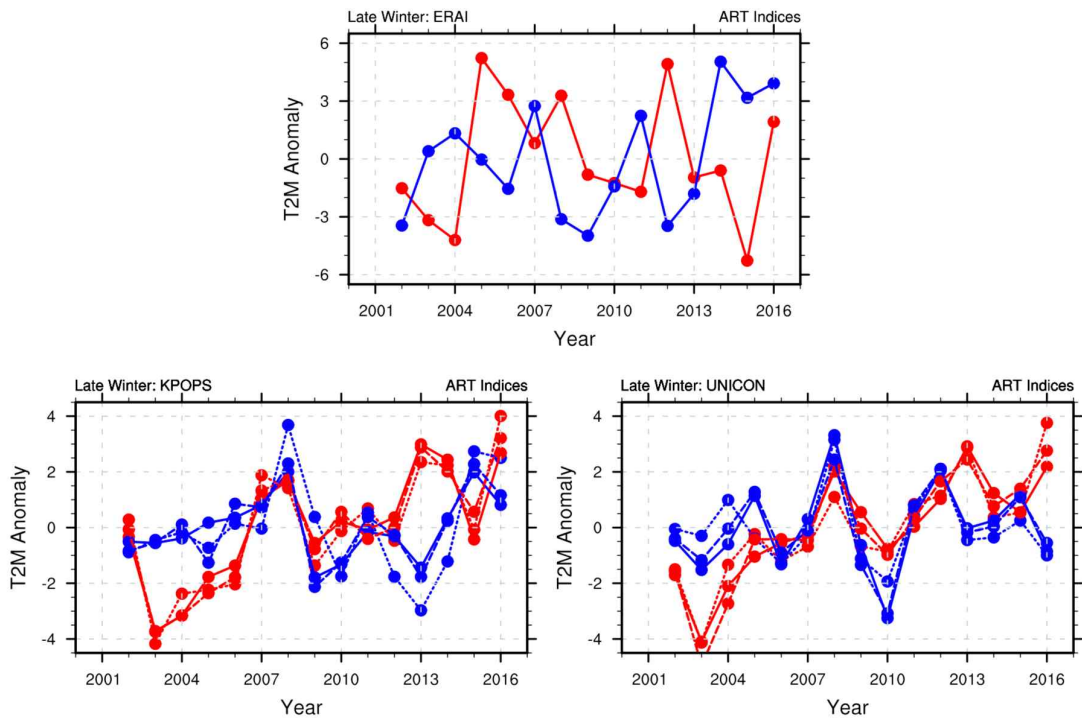


그림 17. T2M anomaly of ART indices in late winter

제 5 장 연구개발목표의 달성도

본 연구에서 기존에 제시한 연구개발 목표 및 달성도는 아래의 표에 정리되어 있다.

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
차세대 구름수직접침 모수화를 탑재한 CAM5-UNICON를 이용하여 극지 기후 예측	1-1	구름수직접침 모수화가 탑재된 CAM5-UNICON을 이용한 극지 기후 예측 시스템 구축	구름수직접침 모수화가 탑재된 CAM5-UNICON을 이용한 극지기후예측 시스템을 구축하여 실험을 완료함	100 (%)
	1-2	CAM5-UNICON과 CAM4의 극지기후 예측 성능 비교	시뮬레이션을 완료하고 CAM5-UNICON과 CAM4의 극지기후 예측 성능을 평가함	100 (%)

표 2. 연구개발의 목표 및 달성 세부사항

연구개발의 첫 번째 세부목표인 “구름수직접침 모수화가 탑재된 CAM5-UNICON을 이용한 극지 기후 예측 시스템 구축”의 경우, 앞서 제시된 바와 같이 CAM5-UNICON을 이용한 극지 기후 예측 시스템을 구축하였다. 본 연구에서는 각 해의 10월 1일에 예측을 시작하는 early winter 예측과 12월 1일에 예측을 시작하는 late winter 예측을 실시하였다.

연구개발의 두 번째 세부목표인 “CAM5-UNICON과 CAM4의 극지기후 예측 성능 비교”를 위해 CAM5-UNICON에서 나온 예측결과와 ERA-Interim reanalysis data의 극지 기후를 비교했다. 극지기후의 대표적인 기후인자로 2m-air temperature (T2M)을 사용하여 모델의 극지기후 예측 성능을 평가하였다. 또한 initial time에서 perturbation 주는 방식으로 15개의 ensemble member를 만들어 early winter 및 late winter 극지기후 예측평가에 사용했다. 극지기후 예측 성능은 제 3장에 제시된 다양한 방법을 통해 평가했다.

제 6 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 나온 연구결과는 극지기후 예측 모델의 결과를 평가하고, 더 나아가 극지기후 예측 모델 성능을 향상시키는 데 아래와 같이 사용될 수 있다.

- ① 차세대 구름수직결집 모수화를 적용한 대기모델을 이용하여 더 정교한 극지기후 예측을 위한 대기모형을 사용할 수 있도록 개발함.
- ② 전지구 모형을 이용한 극지기후 예측 결과를 여러 방식으로 평가함으로써 향후 예측 시스템이 개선해야될 점을 제시하는데 사용될 수 있음.
- ③ 극지기후 예측 결과의 평가 결과를 바탕으로, 극지기후 예측 및 극지기후 모델 개발에 있어서 필요한 정보를 제시함.



제 7 장 참고문헌

Barker, H. W., Stephens, G. L., Partain, P. T., Bergman, J. W., Bonnel, B., Campana, K., ... & Edwards, J. (2003). Assessing 1D atmospheric solar radiative transfer models: Interpretation and handling of unresolved clouds. *Journal of Climate*, 16(16), 2676-2699.

Barker, H. W. (2008). Overlap of fractional cloud for radiation calculations in GCMs: A global analysis using CloudSat and CALIPSO data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D8).

Choi, J., Son, S. W., Ham, Y. G., Lee, J. Y., & Kim, H. M. (2016). Seasonal-to-interannual prediction skills of near-surface air temperature in the CMIP5 decadal hindcast experiments. *Journal of Climate*, 29(4), 1511-1527.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... & Bechtold, P. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553-597.

Goddard, L., Kumar, A., Solomon, A., Smith, D., Boer, G., Gonzalez, P., ... & Kirtman, B. P. (2013). A verification framework for interannual-to-decadal predictions experiments. *Climate Dynamics*, 40(1-2), 245-272.

Hogan, R. J., & Illingworth, A. J. (2000). Deriving cloud overlap statistics from radar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(569), 2903-2909.

Kug, J. S., Jeong, J. H., Jang, Y. S., Kim, B. M., Folland, C. K., Min, S. K., & Son, S. W. (2015). Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nature Geoscience*, 8(10), 759-762.

Liang, X. Z., & Wang, W. C. (1997). Cloud overlap effects on general circulation model climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,

102(D10), 11039–11047.

Morcrette, J. J., & Jakob, C. (2000). The response of the ECMWF model to changes in the cloud overlap assumption. *Monthly weather review*, 128(6), 1707–1732.

Oreopoulos, L., & Norris, P. M. (2011). An analysis of cloud overlap at a midlatitude atmospheric observation facility. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 11(12).

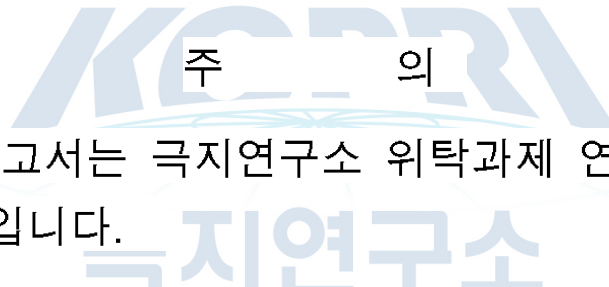
Park, S. (2017). A heuristic parameterization for the integrated vertical overlap of cumulus and stratus. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(6), 2437–2465.

Park, S. (2018). An economical analytical equation for the integrated vertical overlap of cumulus and stratus. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(3), 826–841.

Park, S., Kim, S., Shin, J., & Oh, E. (2019). Impact of Integrated Vertical Overlap of Cumulus and Stratus on the Global Precipitation and Radiation Processes in the Seoul National University Atmosphere Model Version 0 With a Unified Convection Scheme (SAM0 UNICON). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(2), 468–484.

Park, S., Oh, E., Kim, S., & Shin, J. (2019). Impact of Interactive Vertical Overlap of Cumulus and Stratus on Global Aerosol, Precipitation, and Radiation Processes in the Seoul National University Atmosphere Model Version 0 With a Unified Convection Scheme (SAM0 UNICON). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*.

Tompkins, A. M., & Di Giuseppe, F. (2007). Generalizing cloud overlap treatment to include solar zenith angle effects on cloud geometry. *Journal of the atmospheric sciences*, 64(6), 2116–2125.



1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.