

극지역 구름 특성 변화에 따른 기후변화  
영향평가

Assessment of Climate Change in association with the  
variation of Arctic Cloud



서울대학교

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “과거, 현재의 극지기후와 재현을 통한 기후변화 메커니즘 규명” 과제의 위탁연구 “극지역 구름 특성 변화에 따른 기후변화 영향평가” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2017. 1. 31

(본과제) 총괄연구책임자	:	김 성 중
위탁연구기관명	:	서울대학교
위탁연구책임자	:	박 성 수
위탁참여연구원	:	박 성 수



# 요 약 문

## I. 제 목

극지역 구름특성 변화에 따른 기후변화 영향 평가

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

극지역 기후는 한반도를 포함한 동아시아 지역 기후에 큰 영향을 미치며, 최근의 연구에 의하면 극지역 기후는 극지구름과 밀접한 연관이 있다. 하지만 극지 구름이 어떤 과정을 통해서 극지기후에 영향을 미치는지에 대한 연구는 미비한 상태임. 본 연구의 목적은 전지구 기후모델을 이용하여, 극지구름과 극지기후와의 관련성을 이해하는 것임.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

미국 국립대기연구소에서 개발된 전 지구기후모델인 CESM1 (Community Earth System Model version 1) / CAM5 (Community Atmosphere Model version 5)를 이용하여, 극지역 구름 변동을 조절하는 중요 매개변수를 파악하고, 이를 바탕으로 각 변수에 대한 민감도 실험을 진행, 극지구름 및 극지 기후가 이 매개변수들에 어떻게 반응하는지를 파악함. 모델 시뮬레이션 결과를 실제로 관측된 극지역 구름 및 기후 관측 자료와 비교하여, 극지 구름 및 기후 모의에 중요한 영향을 미치는 물리과정을 파악하고, 이를 바탕으로 극지 구름 특성 및 극지 구름이 기후에 미치는 과정을 이해함.

## IV. 연구개발결과

CAM5 내 여러가지 물리 모수화 (구름거시물리, 구름미세물리, 적운모수화)를 구성하는 주요 매개변수 및 물리과정에 대한 다양한 민감도 실험을 실시한 결과, 극지역 적운에서 유출되는 액체 혹은 고체상의 구름 입자에

의해서 형성되는 새로운 형태의 유출적운 (detrained cumulus)을 추가하면, 극지역 하층운, 대기꼭대기에서의 장파복사, 그리고 지면 근처의 온도 등, 여러 가지 측면에서 극지기후 시뮬레이션이 크게 향상됨을 확인함. 또한 유출적운 과정 도입으로 향상된 극지역 구름 모의 성능이 북극 온난화 및 중위도 한파 모의 성능을 향상시킬 수 있음을 추가로 확인함.

## V. 연구개발결과의 활용계획

유출적운 과정이 극지역 구름 및 기후에 중요한 영향을 미친다는 사실은 기존에 알려지지 않았던 새로운 사실임. 크게 두 가지 방향의 추가연구 및 활용이 가능함. 첫째는, 본 연구를 통해서 중요성이 확인된 극지역에서의 유출적운 과정을 실제 관측 자료를 이용하여 확인하고, 이를 바탕으로 모델에서 모의되는 유출적운 과정을 추가적으로 향상시킬 수 있음 것임. 본 연구를 통해서, 극지역을 통과하는 중위도-극지 저기압이 구름 과정을 통해서 극지역 기후에 중요한 영향을 끼친다는 사실이 추론되었으며, 따라서 중위도-극지 저기압과 극지기후와의 관련성에 대한 추가연구가 진행될 수 있을 것임. 둘째, 유출적운 과정이 포함된 전 지구기후모델을 이용하여, 동아시아 및 한반도 기후 예측에 대한 실제적인 적용연구가 이루어질 수 있을 것임.

# S U M M A R Y

(영 문 요약 문)

## I. Title

Assessment of Climate Change in association with the variation of Arctic Cloud

## II. Purpose and Necessity of R&D

Arctic climate system has a large influence on the climate over the East Asia and Korea Peninsula, and recent studies showed that Arctic cloud is an important component of Arctic climate system. However, it is not well known that through which physical mechanism, Arctic cloud influences Arctic climate. The goal of this research is to understand the association between the Arctic cloud and Arctic climate system by using the General Circulation Model.

## III. Contents and Extent of R&D

We performed various parameter sensitivity simulations with the parameters controlling the variations of Arctic cloud by using the CESM1 (Community Earth System Model version 1) / CAM5 (Community Atmosphere Model version 5) developed at the National Center for Atmospheric Research, USA. By comparing model simulations results with the observations, we identified the key processes responsible for the association between the Arctic cloud and Arctic climate system.

## IV. R&D Results

From a series of parameter sensitivity simulations within various physics parameterization suites (e.g., cloud macrophysics, cloud

microphysics, and convection schemes), we found that detrained cumulus generated from the convective updrafts have a large influence on the Arctic climate system. Additional diagnosis of detrained cumulus fraction substantially improved the simulations of low-level cloud, outgoing longwave radiation at the top of the atmosphere and near surface temperature over the Arctic. We also identified that improved simulations of Arctic cloud with the detrained cumulus improved the simulations of Arctic warming and the cold surge from the Arctic into the mid-latitude climate system.

## V. Application Plans of R&D Results

The fact that detrained cumulus has a large influence on the climate over the Arctic is a new finding that has not been reported in the previous studies. Our results have two implications for future research. First, it is necessary to conduct detailed observational studies on the detrained cumulus in association with the synoptic weather system over the Arctic, which is necessary to further refine the parameterization of detrained cumulus. Second, a climate model with appropriate treatment of detrained cumulus can be used to predict the East Asia climate system in association with the Arctic climate system.

# 목 차

제 1 장 서론 .....	7
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	8
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	9
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....	21
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	22
제 6 장 참고문헌 .....	23



## 제 1 장 서론

선행 연구에 의하면 극지역 기후의 경년변동과 극지 구름과는 밀접한 상관관계가 있다고 알려져 있다. 특히 극지 구름 모수화에 따라서, 기후모델이 실제 관측되는 ‘북극 온난화 - 중위도 냉각화’ 상관현상을 잘 시뮬레이션하기도 하고, 혹은 그렇지 않기도 하다. (Kim et al. 2014) 이러한 사실은 극지기후를 모의함에 있어 극지구름에 대한 이해가 매우 중요함을 확인해 주고 있다. 그러나 현재까지 극지구름이 어떠한 물리 및 역학과정을 거쳐 극지 대기 순환장에 어떠한 영향을 미치는지 연구가 미비한 실정이다.

본 위탁 연구에서는 본 과제에서 모델링을 통해 극지 기후 재현 연구에 초점을 맞추고 있음에 착안하여 극지 구름이 어떠한 물리적 메커니즘을 거쳐 극지 기후와 대규모 대기 순환장에 영향을 미치는지 모델링을 통해 규명하고자 한다. 이를 위해 최신 미국 국립대기연구소에서 개발된 전 지구기후모델인 CESM1 (Community Earth System Model version 1) / CAM5 (Community Atmosphere Model version 5)를 이용하여, 극지역 구름 변동을 조절하는 중요 매개변수를 파악하고, 이를 바탕으로 각 변수에 대한 민감도 실험을 진행, 극지 구름 및 극지 기후가 이 매개변수들에 어떻게 반응하는지를 파악하였다. 모델 시뮬레이션 결과를 실제로 관측된 극지역 구름 및 기후 관측 자료와 비교하여, 극지 구름 및 기후 모의에 중요한 영향을 미치는 물리과정을 파악하고, 이를 바탕으로 극지 구름 특성 및 극지 구름이 기후에 미치는 과정을 이해하고자 한다. 또한, 관측되는 ‘북극 온난화 - 주변대륙 냉각화’ 상관현상이 어떤 매개변수 집합의 모의에 의해 잘 나타나는지 조사한 후, 이를 바탕으로 다양한 분석기법을 이용해서, 극지구름과 극지기후와의 상관성을 결정짓는 핵심 메커니즘을 발견하고자 한다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

북극 지역 구름 특성에 관한 연구는 비교적 최근해야 이루어지고 있다. Morrison et al. (2011)에 의하면 위성 관측에 근거하여 북극 지역 구름은 지속적인 혼합상 구름 (Mixed-phase cloud) 의 특성을 보여주고 있다고 밝히고 있다. 그러나 이러한 극지역 혼합상 구름이 극지 기후에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구는 현재까지 이루어지지 않고 있다. 또한 최근 세계적으로 이슈가 되고 있는 ‘북극 온난화 - 중위도 냉각화’ 현상에 있어서 극지 구름의 역할이 매우 중요할 것이라고 판단되고 있으나, 정확히 그 역할을 평가하고 분석한 연구는 전무하다.



## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1절 적은 유출 구름이 극지 기후에 미치는 영향

최근 연구에 따르면 북극지역은 1년 내내 지속적으로 혼합상 구름 (구름 물과 구름 얼음이 함께 존재하는 구름) 의 특성을 보여주고 있음을 밝히고 있다. [Morrison et al., 2011; Shupe et al., 2011]. 그러나 이러한 혼합상 구름은 일반적으로 중위도에서는 구름 물과 구름 얼음 사이의 vapor pressure 차이로 인해 지속될 수 없다. (the Wegener - Bergeron - Findeisen (WBF) mechanism) [Wegener 1911; Bergeron 1935; Findeisen 1938]. 이러한 사실은 극지역 구름 형성 과정에서 구름 물을 지속적으로 공급해 주는 과정이 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 기후 모델을 이용하여 극지 구름을 형성하는 다양한 요소들의 민감도 실험을 수행하였다. 그 결과 적운에서 유출되는 유출 구름(convective detrainment cloud)이 극지역 혼합상 구름을 지속시키는데 매우 중요한 요인 중 하나임을 밝혀내었다.



#### 1. 연구 방법

본 위탁과제에서는 극지 혼합상 구름의 효과를 알아보기 위해 미국 NCAR에서 개발된 전지구 기후 모형 CESM/CAM5와 최근 개발된 차세대 적은 모수화 기법을 적용한 UNICON [Park, 2014a, 2014b] 모형을 도입하였다. 또한 극지 혼합상 구름의 형성에 있어서 적은 유출 구름의 역할을 알아보기 위해 새로운 적은 유출 구름 모수화 방안을 개발하고 이를 UNICON 모형에 접합 하였다.

기존 CAM5 모형에서는 적운에서 유출되는 유출 구름이 주변으로 퍼지게 되면 구름이 있는 지역에서는 남아있지만 그렇지 않은 지역에서는 즉시 증발된다고 가정하였다. 이렇게 증발된 구름 물은 주변의 상대습도를 높이게 되고 그로 인해 유출 구름에 의해 구름 양이 증가할 것이라고 기대하였다. 그러나 본 연구에서 다양한 분석 방법으로 확인한 결과 그 효과는 매우 미비하였다. 새롭게 개발된 적은 유출 구름 모수화 방안에서는 구름이 없는 지역에서도 유출된 구름이 바로 증발되는 것이 아니라, 그 자체로 새로운 구름을 형성한다고 가정하였다. 또한 유출 구름이 주변으로 퍼질 때 구름 물과 구름 얼음의 비율은 주변 공기 온도에 의해 결정되는데, 새롭게 개발된 방안에서는 그 함수를 조정함으로써, 구름 물이 상대적으로 좀 더 많이 생성되도록 하였다. 이러한 새로운 적은 유출 구름 방안을

UNICON에 적용하였으며, 앞으로 이를 편의상 ‘UNICON’이라 칭하겠다. 본 연구에서는 기존 CAM5와 UNICON을 비교함으로써, 적은 유출 구름이 극지역 기후에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

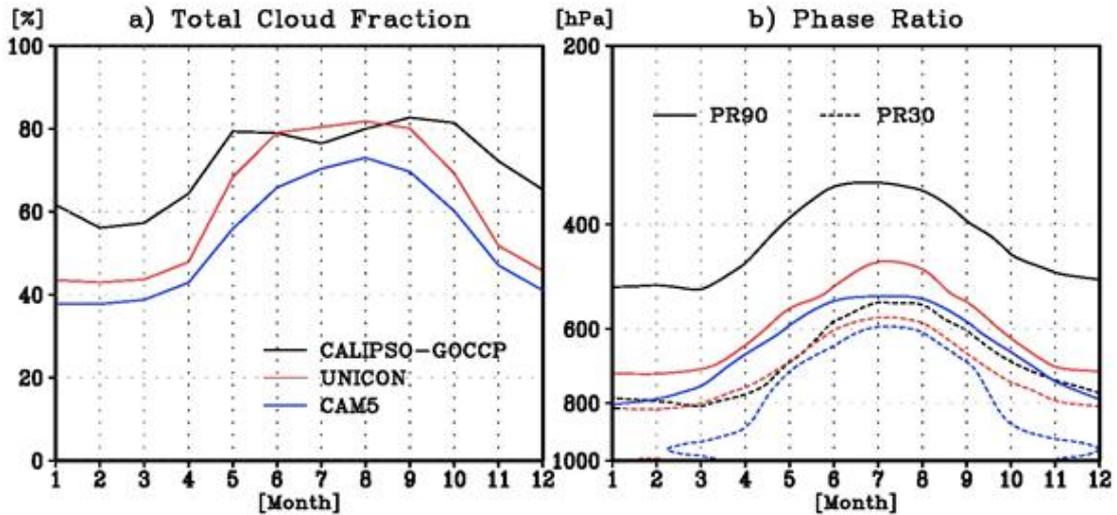


Fig. 1 The annual cycles of (a) total cloud fraction, and (b) the height where the ratio of ice condensate among total condensate is 90% (the phase ratio, PR90, solid) and 30% (PR30, dotted) averaged over the Arctic region (north of 65°N) from CAM5 (blue), UNICON (red) and the CALIPSO-GOCCP observation (black).

## 2. 극지역 구름 모의 성능 향상

Fig. 1a는 평균적인 북극 지역 구름 양을 관측 자료(위성관측, CALIPSO-GOCCP), CAM5, UNICON에 대해 월별로 보여준다. 두 실험 모두 관측에 비해 더 적은 양의 구름을 모의하고 있는데, 이는 비단 두 모형에서 뿐만 아니라 전 세계에서 사용되는 대부분의 전지구 기후 모형에서도 공통적으로 나타나는 문제로 잘 알려져 있다. [Kay et al., 2012] 그러나 CAM5에 비해 UNICON이 좀 더 많은 양의 극지 구름의 모의함으로써 그 오차를 감소시켰다. Fig. 1b는 구름 내의 구름 물과 구름 얼음의 비율을 나타내고 있는데, 관측에 비해 CAM5 모형 결과는 구름 물을 너무 적게 모의하고 있다. 즉, 극지역에서 관측되는 혼합상 구름을 모의하지 못한다는 것을 의미한다. UNICON의 경우 그 오차를 크게 감소시켰으며, 특히 겨울철 하층에서는 관측과 거의 일치하는 결과를 보여주었다.

이러한 북극 구름 모의 성능 향상은 구름의 연직 구조에서도 잘 나타난다(Fig. 2). UNICON은 CAM5에 비해 특히 하층에 구름 양이 크게 증가하였고 이러한 구름의 증가는 구름 물의 증가로 인해 일어난다. 구름 얼음의 경우 오히려 상대적으

로 작게 모의되었다. 이러한 결과는 UNICON이 CAM5에 비해 북극 지역 혼합상 구름의 모의를 크게 향상 시켰음을 의미한다.

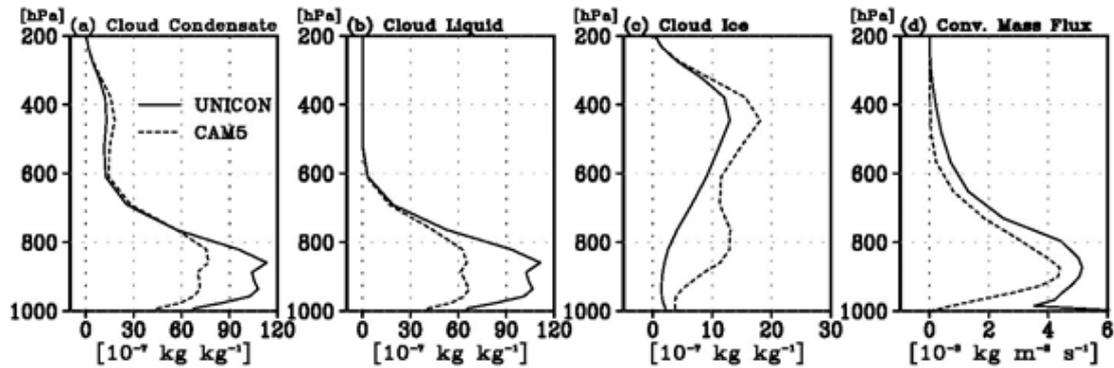


Fig. 2. The annual-mean vertical profiles of grid mean (a) cloud condensate mass (cloud liquid + cloud ice), (b) cloud liquid mass, (c) cloud ice mass, and (d) convective updraft mass flux averaged over the Arctic region from CAM5 (solid) and UNICON (dashed).

UNICON에서 이러한 구름 물의 증가 원인을 살펴보기 위해 모델내에서 계산되는 cloud liquid tendency의 모든 요소들을 살펴보았다. (Fig. 3) CAM5와 UNICON 모두에서, 북극 지역 구름을 형성하는데 있어서 중요한 두 가지 특징이 있는데, 첫째, 앞서 설명한 적운 유출 구름 모수화 방안이 포함된 Net Condensate 과정과 적운 유출 구름 양이 가장 중요한 Source이며, 두 번째, 강수 현상과 관련한 구름 미세 물리 과정이 가장 중요한 Sink이다. 적운에 의한 효과와 PBL 모수화 방안에 의한 효과는 크지 않았다. 두 모델 사이의 가장 큰 차이점은 cloud liquid tendency에서 Net Condensate와 적운 유출 구름 양에서 나타난다. 흥미로운 점은 적운 유출 구름 양 자체는 UNICON보다 CAM5가 더 크게 나타나는데 Net Condensate 값은 UNICON이 훨씬 크게 나타난다. 이 둘을 합치면 UNICON에서 더 많은 양의 구름 물의 모의한다. 이러한 사실은 앞서 설명한 적운 유출 구름을 어떻게 다루는가가 매우 중요하다는 것을 말해주며, UNICON에서 새롭게 개발된 적운 유출 구름 모수화 방안이 가장 중요한 요인임을 의미한다.

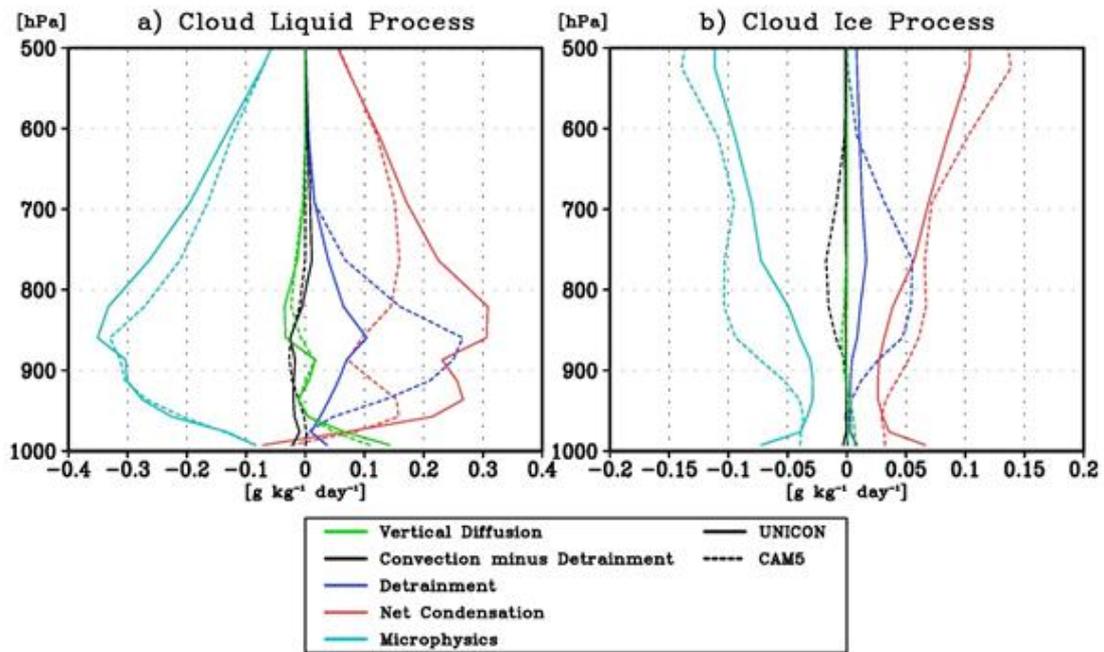


Fig. 3. Annual-mean vertical profiles of grid-mean tendencies of (a) cloud liquid and (b) cloud ice masses averaged over the Arctic region from various physics schemes – PBL scheme (green, vertical diffusion), convection scheme minus convective detrainment (black), convective detrainment (blue), cloud macrophysics scheme (red, net condensation) and cloud microphysics scheme (cyan) – from CAM5 (dotted) and UNICON (solid).

### 3. 북극 혼합상 구름이 극지 기후에 미치는 영향

북극 혼합상 구름 모의 성능 향상이 극지역 기후에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해 Fig.4에서 겨울철 구름 양, 대기 상층에서 장파 복사량, 지면 근처의 대기 온도를 각각 관측과 두 모델의 오차를 나타내었다. CAM5와 비교하여 UNICON에서 더 많은 양의 구름을 모의하였고, 더 많은 장파 복사를 방출하였으며, 더 따뜻한 지면 온도를 모의하였다. 이러한 결과는 기존 CAM5에 비해 관측과의 오차를 크게 줄였다.

여름의 경우 또한 구름 양, 단파 복사 강제력, 지면 근처 대기 온도를 나타내었는데(Fig. 5), 모든 변수에 있어서 관측과의 오차를 크게 줄이는 효과를 보였다. 구름의 증가는 태양으로 부터의 단파 복사를 감소시켜, 과대 모의 하던 오차를 크게 줄였고, 이는 육지에서는 지면 냉각화를 해빙 지역에서는 온난화를 나타낸다.



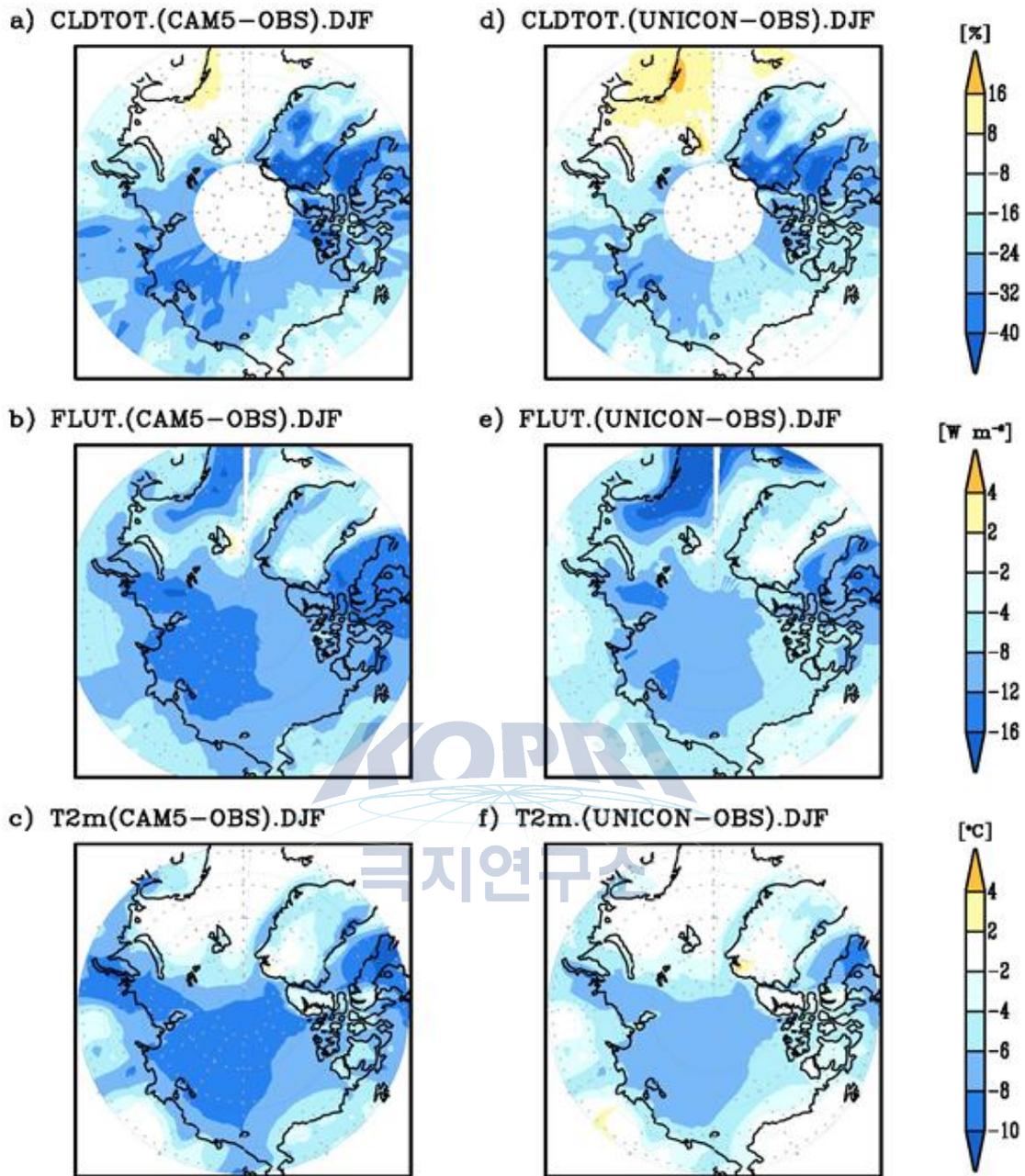


Fig. 4. The biases of (upper) low-level cloud fraction (CLDLow) against the CALIPSO-GOCCP observation, (middle) upward LW radiative flux at TOA (FLUT) against the CERES-EBAF observation, and (lower) near surface air temperature at 2 meter height (T2m) against the ERA-interim reanalysis product from January 1979 to February 2015 (Dee et al. 2011) during December-January-February (DJF). The left panels are from CAM5 simulation and the right panels are from UNICON simulation.

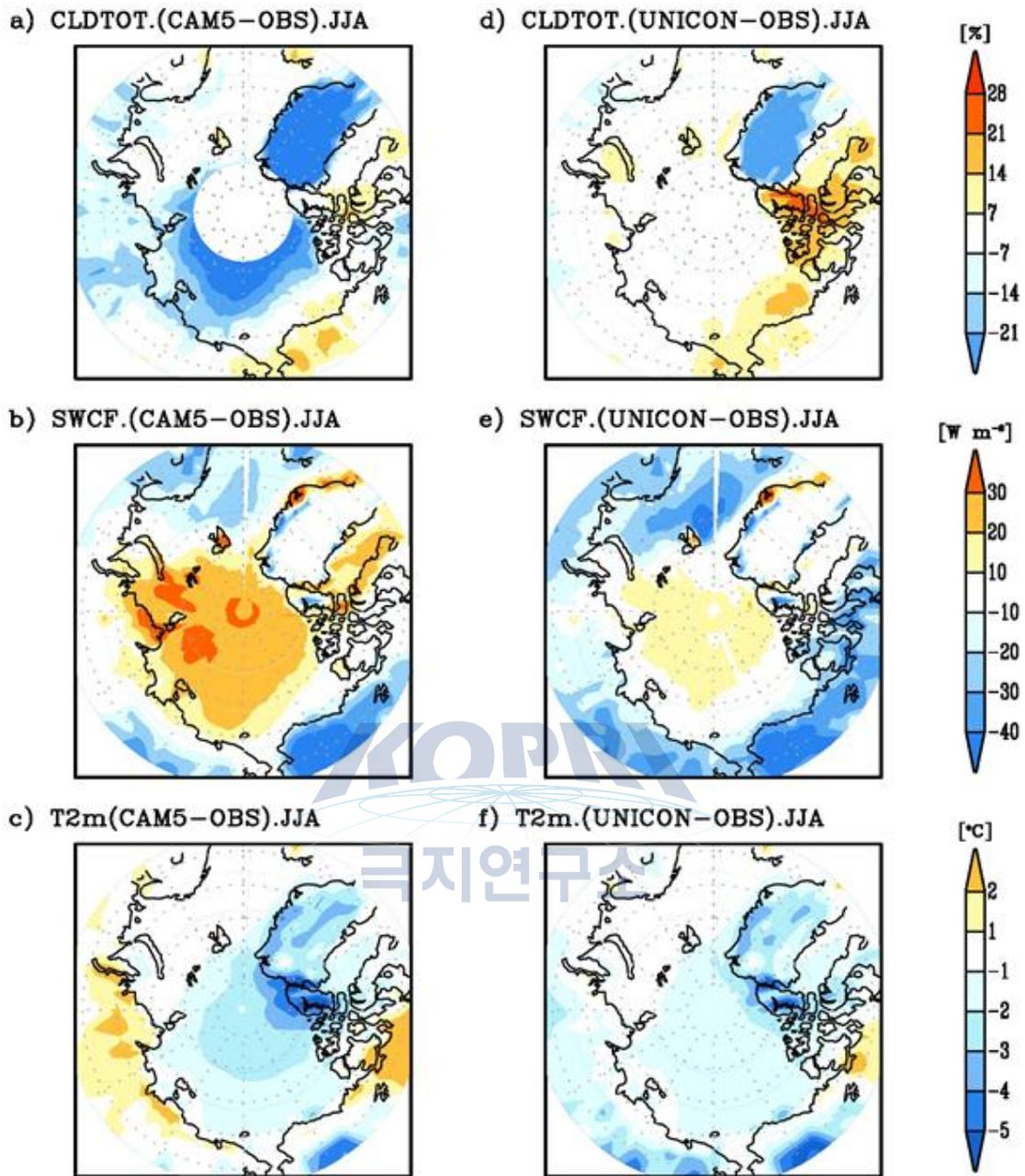


Fig. 5. Same as Fig.4 except for short wave cloud forcing (SWCF) in middle panels and during June-July-August (JJA).

## 제 2절 극지역 적운 모수화 과정이 ‘북극 온난화 - 중위도 냉각화’ 현상에 미치는 영향

최근 급속히 가속화 되고 있는 북극 온난화는 극지역을 넘어 중위도 지역까지 그 영향을 미치고 있음이 보고되고 있다. 특히 북극 해빙 감소로 인한 북극 온난화에 따른 대기 순환장은 극지역에 고기압을 강화시키고 이는 다시 풍하층인 중위도 지역에 저기압성 회전을 강화시킴으로써 중위도지역 냉각화를 야기시킨다. (Kug et al. 2015) 이를 ‘북극 온난화 - 중위도 냉각화’ 현상이라 일컫는다. 그런데 극지 구름 모수화에 따라서, 기후모델이 실제 관측되는 ‘북극 온난화 - 중위도 냉각화’ 상관현상을 잘 시뮬레이션하기도 하고, 혹은 그렇지 않기도 하다. (Kim et al. 2014) 이러한 사실은 극지기후를 모의함에 있어 극지구름에 대한 이해가 매우 중요함을 확인해 주고 있다. 그러나 현재까지 극지구름이 어떠한 물리 및 역학과정을 거쳐 극지 대기 순환장에 어떠한 영향을 미치는지 연구가 미비한 실정이다. 본 연구에서는 서로 다른 적운 모수화 방안을 이용해 북극 구름이 어떻게 중위도에 영향을 미치는 살펴 보고자 한다.

### 1. 연구 방법

앞선 연구와 마찬가지로 서로 다른 적운 모수화 방안을 가지고 있는 CESM/CAM5 모형과 최근 개발된 차세대 적운 모수화 방안이 접합된 UNICON 모형을 도입하였다. 두 실험 모두 관측과 동등한 비교를 위해 1979년부터 2015년까지 위도 1.9도 경도 2.5도 간격의 수평 격자를 가지고 AMIP타입의 실험을 수행하였고, 불확실성을 줄이기 위해 각각 5개씩의 앙상블 런을 수행하였다.

위 결과를 가지고, 급격한 해빙 감소로 인해 ‘북극 온난화 - 중위도 냉각화’ 현상이 가장 강했던 2012년 겨울을 선택하여 각 실험 결과의 평균값에 대한 Anomaly를 계산하여 두 모형의 차이를 비교하였다.

### 2. 결과

Fig. 6은 지면 근처 온도와 sea-level pressure 그리고 500 hPa 지위 고도장의 anomaly를 각각 관측 자료 (ERA-interim reanalysis), CAM5, UNICON에서 나타낸 그림이다. 관측에서 나타나는 동아시아 지역 cold가 UNICON에서는 어느 정도 잡히지만 CAM5에서는 한반도 주변으로만 약하게 모의하였다. CAM5의 경우 Barents-Kara (BK) sea 지역 지표 warming이 대륙쪽으로 지나치게 장출되는 반면 UNICON에서는 상대적으로 극지역에 집중되면서 관측과 유사한 패턴을 나타

내었다. 또한 sea level pressure (contour in Fig. 6a, c, e) 패턴에서 시베리아 고기압 강화가 unicon에서는 나타나지만 CAM5에서는 나타나지 않는다. 500 hPa 지위 고도장의 경우, BK sea 지역 해빙의 감소와 연관된 Ural 지역 고기압성 회전이 UNICON에서는 관측과 유사하다. CAM5에서는 상대적으로 대륙쪽으로 떨어져 나와 발행한다. 즉, UNICON에서 극지역 고기압성 회전, 중위도 동아시아 지역 저기압성 회전 패턴이 더 잘 모의 되는 것을 확인하였다. Fig. 7은 BK sea 지역과 동아시아 지역을 가로지르는 면의 온도와 지위 고도장의 연직 분포를 나타낸다. 관측과 UNICON에서는 BK 지역 warm이 상층까지 전파되어 나타나는 반면, CAM5에서는 극지역 하층에 trap 되어 나타나고 대륙쪽으로 남하하여 상층 warm이 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 지면 근처 warming이 중위도 지역으로 장출하는 현상과 일맥 상통한다. 지위 고도장의 연직 분포는 온도 분포와 일치하여 나타난다. 이러한 현상은 BK sea 지역의 지면으로부터의 heating이 상층까지 잘 전파되어야 상층의 대기 순환장을 바꾸고 대기 파동 전파에 의해 중위도에 영향을 미친다는 사실을 보여준다.

두 실험에서 가장 큰 차이는 적은 모수화 방안에 있다. 즉, UNICON이 CAM5에 비해 지면 열의 연직 전파 효과가 더 크다고 말할 수 있다. 이를 확인하기 위해 대기 중층(500hPa)에서 적운에 의한 질량속(convective mass flux, CMFMC)과 그로 인한 온도 tendency(CMFDT)를 나타내었다. (Fig. 8a, b, c, d) 두 값 모두 CAM5에 비해 UNICON에서 더 크게 나타났으며, 이는 UNICON이 대기 중 상층까지 열을 더욱 잘 전달한다는 것을 의미한다. 각 변수의 연직 구조를 살펴보면 (Fig. 8e, f), 중하층에서 CMFMC, CMFDT 크기는 CAM5가 더 크지만 600hpa 아래로 한정되어있는 반면 UNICON의 경우, 400hpa 이상까지 나타남을 알 수 있다.

결과적으로 ‘북극 온난화 - 중위도 냉각화’ 현상을 모의함에 있어서 적운에 의한 연직 열 전파가 매우 중요한 요인 중 하나임을 말해준다.

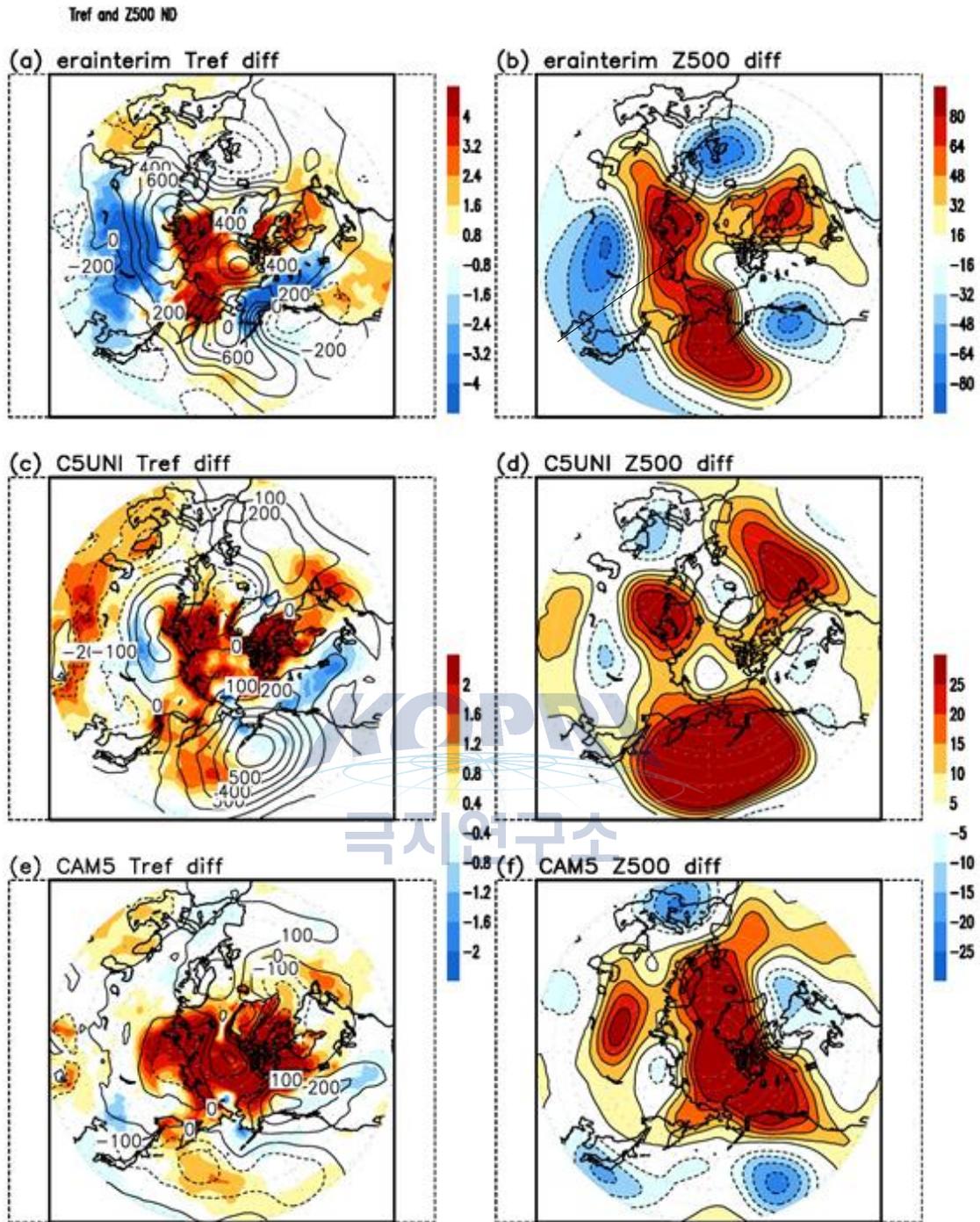


Fig. 6. The average of (left) near surface air temperature (Tref) and (right) 500 hPa geopotential height (Z500) of (upper) the ERA-interim reanalysis, (middle) UNICON, and (lower) CAM5 simulation during November-December (ND).

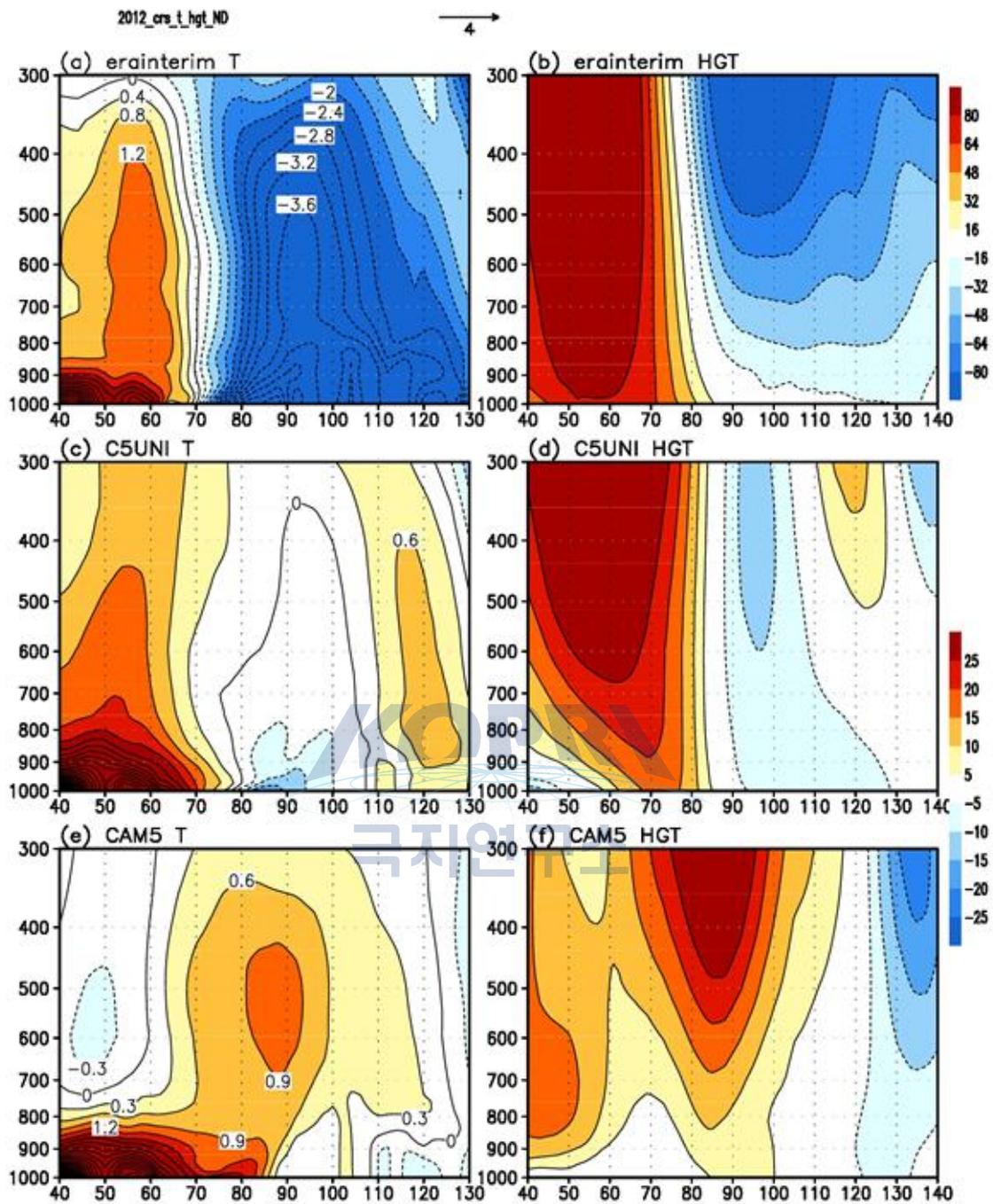


Fig. 7. The vertical cross-section of (left) temperature (T) and (right) geopotential height (HGT) of (upper) the ERA-interim reanalysis, (middle) UNICON, and (lower) CAM5 simulation along line in Fig6b.

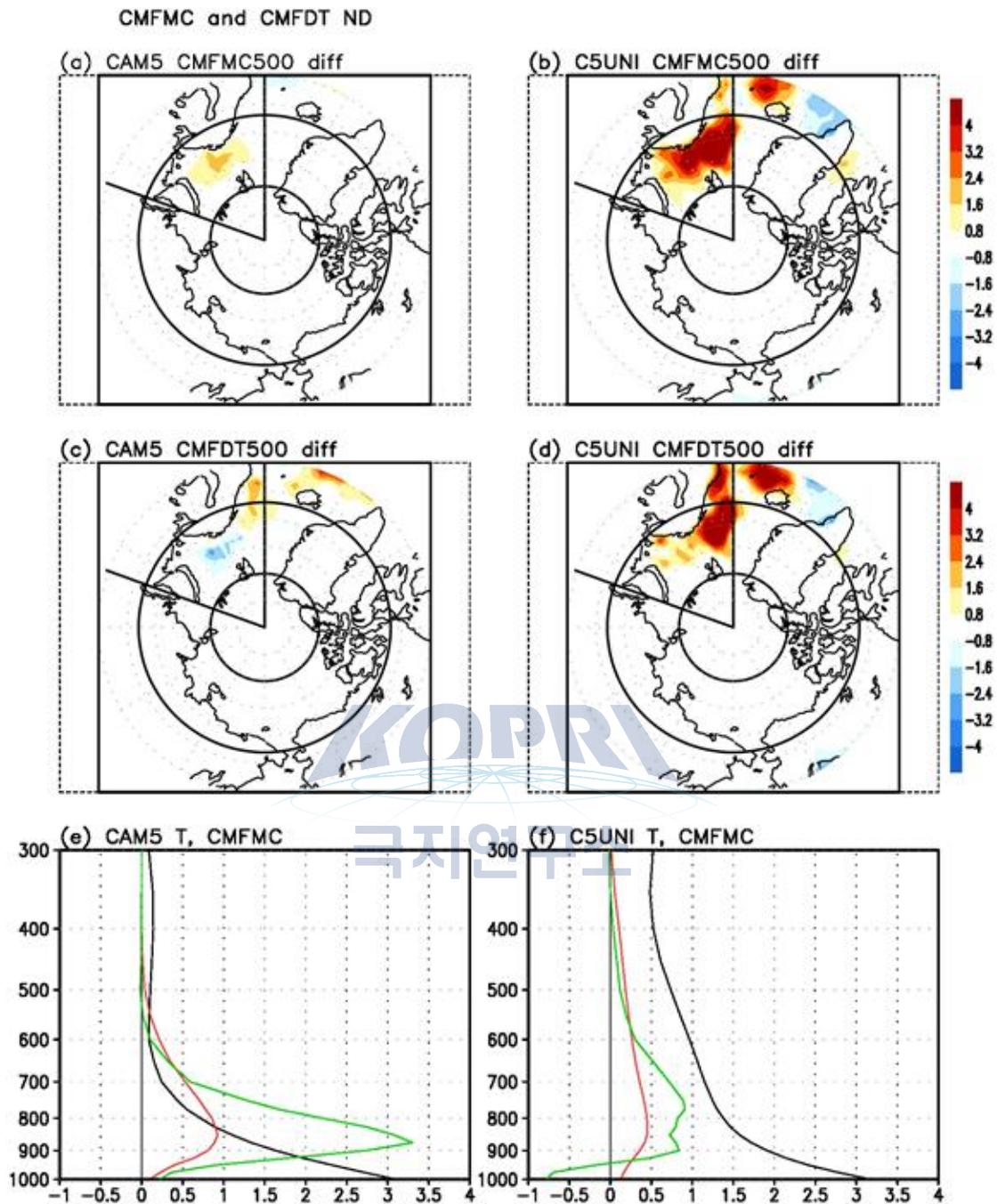


Fig. 8. The average of (left) convective mass flux (CMFMC) and (right) temperature tendency by CMFMC (CMFDT) of (upper) UNICON, (middle) CAM5 at 500 hPa. The vertical structure of area (trapezoid region in Fig. 8a) average of temperature (black), CMFMC (red), and CMFDT (green) for (left bottom) CAM5 and (right bottom) UNICON simulation.

## 제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 제 1절 연구개발목표 달성도

1차년도 (2015년) 의 연구개발목표는 기존 구름 미세물리 모델의 이해 및 적운 모델로의 적용이었으며, 2차년도 (2016년)의 연구개발목표는 극지역 구름 특성변화가 유도하는 대기 순환장 변화 모의 및 평가 었음. 이를 위하여, 논문을 이용한 기존 연구의 이해 및 모델 셋팅, 민감도 실험 및 분석, 그리고 메커니즘 발견이 평가의 척도였음. 계획된 모든 연구는 100% 진행되었음. SCI논문 1편 작성이 계획되었으 며, 본 연구결과는 관련 해외저널에 투고되어 현재 심사가 진행중임.

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
극지역 구름 특성 변화가 유도하는 대기 순환장 변화 모의 및 평가	1-1	구름 물리 모수화 개선 방안을 활용하여 극지 구름 특성 변화에 따른 민감도 분석	- 극지구름변동에 영향을 미치는 매개변수 선정 및 민감도 실험	- 민감도 실험여부 (100%)
	1-2	북극 온난화와 중위도 한파 사이의 관계에서 극지 구름의 역할 분석.	- 민감도 실험중 관측과 유사한 상관관계를 보이는 실험을 추출 - 관측과 유사한 상관을 보이는 실험들이 왜 그러한 유사성을 보이는지 집중 분석 후 메커니즘 도출	- 민감도 실험 분석여부 (100%) - 메커니즘 발견여부 (100%) - SCI 논문 1편 작성 여부 (100%)

### 제 2절 대외기여도

본 연구를 통해서 발견한, 유출적운이 극지역 구름 및 기후에 중요한 역할을 한다는 사실은 기존의 연구에서 보고되지 않은 새로운 사실임. 앞으로 극지역 유출적운의 특성과 이와 관련한 후속연구가 다양하게 진행될 것으로 예상됨

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

두 가지 방향의 추가연구 및 활용이 가능함. 첫째, 본 연구를 통해서 중요성이 확인된 극지역에서의 유출적운을 확인하기 위한 관측 연구를 실시할 수 있음. 둘째, 유출적운 과정이 포함된 전지구기후모델을 이용하여, 극지기후와 관련한 동아시아 및 한반도 기후 예측에 대한 실제적인 적용연구가 이루어질 수 있을 것임.



## 제 6 장 참고문헌

Kay, J. E. et al. (2012), Exposing global cloud biases in the Community Atmosphere Model (CAM) using satellite observations and their corresponding instrument simulators, *J. Clim.*, 25(15), 5190 - 5207, doi:10.1175/JCLI-D-11-00469.1.

Kim, B.-M., S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and J.-H. Yoon (2014), Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss, *Nat. Commun.*, 5, 1 - 8, doi:10.1038/ncomms5646.

Morrison, H., G. de Boer, G. Feingold, J. Harrington, M. D. Shupe, and K. Sulia (2011), Resilience of persistent Arctic mixed-phase clouds, *Nat. Geosci.*, 5(1), 11 - 17, doi:10.1038/ngeo1332.

Park, S. (2014a), A Unified Convection Scheme, UNICON. Part I. Formulation, *J. Atmos. Sci.*, (Lcl), 140808112307001, doi:10.1175/JAS-D-13-0234.1.

Park, S. (2014b), A Unified Convection Scheme, UNICON. Part II. Simulation, *J. Atmos. Sci.*, (Lcl), 140808112307001, doi:10.1175/JAS-D-13-0234.1.

Shupe, M. D., V. P. Walden, E. Eloranta, T. Uttal, J. R. Campbell, S. M. Starkweather, and M. Shiobara (2011), Clouds at Arctic atmospheric observatories. Part I: Occurrence and macrophysical properties, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 50(3), 626 - 644, doi:10.1175/2010JAMC2467.1.

○ 이 연구는 극지연구소의 지원을 받아 수행되었습니다. (PE16010)

## 뒷 면

### 주 의

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.