

서로 다른 대기 재분석 자료에 의해 강제된 해빙 모델 CICE5의 북극 해빙 반응 민감도 분석

이수봉^{1,2}, 김백민¹, 김주홍¹, 강성호¹, 안중배²

¹ 극지연구소

² 부산대학교 대기환경과학과

1. Introduction

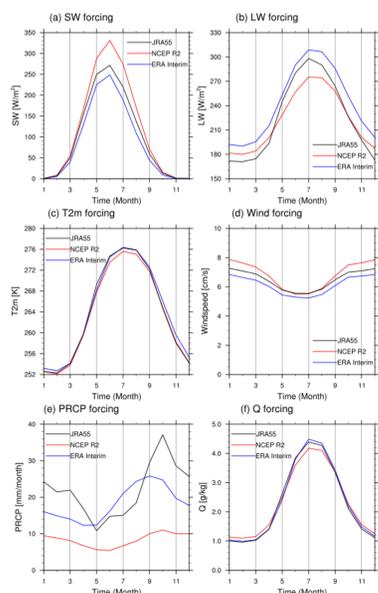
- Arctic sea ice cover의 감소가 최근 가속되고 있다 (e.g., Comiso et al. 2008; Stroeve et al. 2012). 이러한 급격한 북극 해빙의 변화를 설명하기 위해서 해빙 모델링이 주요한 도구로 사용될 수 있다 (Chaudhuri et al. 2014).
- 재분석자료는 관측보다 공간 시간적 해상도가 높으며 다양한 종류의 관측정보가 결합되어있기 때문에 모델의 강제력으로 사용하기에 매우 유용하다 (Screen and Simonds, 2011). 그러나 북극해 영역은 다른 위도와 비교하여 관측이 적기 때문에 재분석 자료에 포함된 불확실성이 크다는 치명적인 단점이 존재한다.
- 대기 강제력에 따라 북극 해빙 두께와 부피는 매우 민감하게 반응한다. 어떤 재분석자료 세트를 강제력으로 사용하느냐에 따라 해빙부피의 트렌드가 약 1.6배까지 차이 난다(Lindsay et al., 2014; Notz et al., 2013).
- 본 연구는 해빙 모델의 강제력으로 사용되는 재분석자료에 포함된 불확실성으로 인해 야기될 수 있는 해빙 부피의 차이에 집중하고자 하였다. 또한 강제력 변수들 중 어떤 변수의 불확실성이 해빙 부피의 차이를 가장 크게 만드는 지와 어떠한 과정을 통해 강제력 변수들에 포함된 불확실성이 해빙모사에 영향을 미치는지도 분석하고자 했다.

2. Experimental design

Model	CICE5 stand alone
Initial Condition	No ICE
Atm. Boundary Condition	FORCING 1) NCEP R2 (Kanamitsu et al. 2002) FORCING 2) ERA-Interim (Dee et al. 2011) FORCING 3) JRA-55 (Kobayashi et al. 2015) 6hourly : T,U,V,Q, Air Density Monthly : Downward Longwave Rad, Downward Shortwave Rad, Precipitation
Ocn. Boundary Condition	Monthly HadISST, default SSS
Dynamics	EAP (Elastic-Anisotropic-Plastic)
Thermodynamics	Mushy
Integration Period	1982-2014

EXP name	Description
CONTROL	All variables from JRA-55
SW(NCEP)	Same as CONTROL except downward shortwave radiation (NCEP R2)
LW(NCEP)	Same as CONTROL except downward longwave radiation (NCEP R2)
T2m(NCEP)	same as CONTROL except temperature (NCEP R2)
U10(NCEP)	same as CONTROL except U, V wind (NCEP R2)
PRCP(NCEP)	same as CONTROL except precipitation (NCEP R2)
Q(NCEP)	same as CONTROL except surface specific humidity (NCEP R2)

3. Atmospheric reanalyses intercomparison

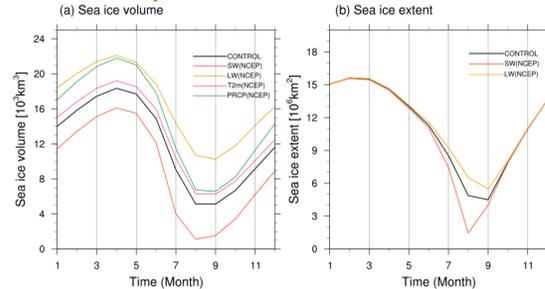


◀그림 1. 해빙모델에 사용되는 대기 강제력 변수들의 북극해 영역 평균 annual cycle

- 대부분의 대기 강제력 변수에 대하여 재분석자료들의 계절성은 유사하지만 각 자료 별 평균차이가 존재한다.
- 하향단파복사(SW forcing)에서는 다른 강제력 변수들 보다 재분석자료간 평균 차이가 크다 (그림 1 (a)). NCEP R2와 ERA-Interim의 하향단파복사는 여름철에 최대 80 W/m²까지 차이가 난다. 하향장파복사에서는 하향단파복사보다 정도가 덜하지만 재분석자료간의 평균 차이가 연중 약 30 W/m²내외로 지속된다(그림 1 (b)).
- 기온과 비습은 계절성과 비교하여 재분석자료간 차이가 상대적으로 적어보인다 (그림 1의 (c)와 (f)).
- 재분석자료간 풍속은 겨울에 약 1 m/s 정도 차이가 나며 여름철은 상대적으로 자료간 차이가 적다 (그림 1의 (d)).
- NCEP R2 강수와 JRA55의 강수는 약 2배 이상의 차이가 있을 뿐 아니라 계절성 또한 다르다 (그림 1 (e)).

4. Sea ice response to atmospheric forcing

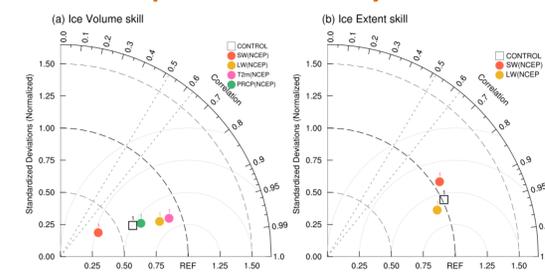
Sea ice response : Mean state



◀그림 2. 1991년부터 2014년 평균 북극의 (a) 해빙 부피와 (b) 해빙 면적.

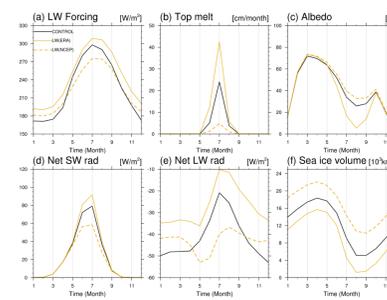
- 어떤 대기 강제력 변수를 다른 재분석자료로 치환했는지에 따라 해빙 모델이 만들어 내는 해빙부피의 mean state 범위 및 interannual variability가 상당히 달라진다.
- 복사 강제력을 치환한 실험 (SW(NCEP)과 LW(NCEP))들에서 CONTROL과 비교하여 해빙 부피의 mean state와 interannual variability가 가장 큰 폭으로 달라졌다.
- PRCP(NCEP) 실험에서 특히 겨울철에 CONTROL의 해빙 부피와 차이가 크다.
- 기온 강제력의 치환 (T2m(NCEP))은 해빙 부피의 annual cycle에는 크게 영향을 주지 않지만, 해빙 부피의 standard deviation에는 강제력 변수들 중 가장 큰 영향력을 미친다.
- 대부분 실험들에서 해빙 면적의 평균과 interannual variability는 CONTROL과의 차이가 크지 않다.

Sea ice response : Variability



◀그림 3. 북극 영역의 (a) 해빙 부피와 (b) 해빙 면적에 대한 Taylor diagram.

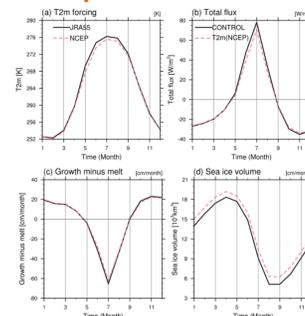
Sea ice response to thermal forcing : Radiation



◀그림 4. LW 실험 비교. (a) 하향단파복사 강제력 (b) 해빙의 상층 용융 (c) 해빙이 존재하는 영역 평균 알베도 (d) 순단파복사 플럭스와 (e) 순장파복사 플럭스 (f) 해빙 부피.

- 해빙 모델에서 CONTROL보다 더 큰(작은) 복사 강제력이 입력되었다는 것(LW(ERA)/LW(NCEP))은 해빙 표면으로 유입되는 에너지의 양이 증가(감소)함을 의미한다.
- 해빙-알베도 피드백을 통해 복사 강제력 실험에서 여름철 해빙의 용융은 가속화(둔화)된다.

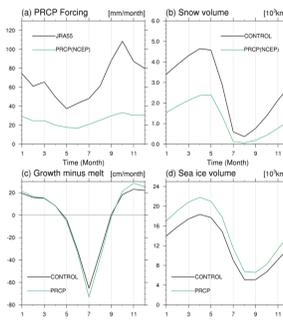
Sea ice response to thermal forcing : Temperature



◀그림 5. T2m 실험 비교. (a) 기온 강제력 (b) 전체 플럭스 (c) 해빙생성과 용융의 차이 (d) 해빙 부피.

- 기온 강제력을 치환한 결과 그 반응이 현열과 뿐 아니라 복사 플럭스에도 영향을 미친다. T2m(NCEP) 실험은 평균해빙부피에 대한 효과가 크지 않지만 PIOMAS의 해빙 부피 변동성의 90%까지도 설명한다. 이는 기온 강제력이 해빙부피의 변동성 모사에 중요한 영향을 미치는 것을 의미한다.

Sea ice response to hydrological forcing : Precipitation



◀그림 6. PRCP 실험. (a) Precipitation 강제력 (b) 눈의 부피 (c) 결빙과 용융의 차이 (d) 해빙 부피.

- 강수 강제력은 눈의 직접적인 source이며 해빙 위의 눈은 대기와 해빙 사이의 열교환을 막는 절연체로서의 역할을 담당한다.
- 눈 덮임이 절반으로 줄어들었기 때문에 PRCP(NCEP) 실험에서 대기와 해빙 사이의 에너지 교환은 좀 더 활발하게 이루어진다.
- PRCP(NCEP) 실험에서 결빙 시기에는 더 많은 해빙이 생성되고, 해빙이 녹는 시기에는 더 많은 해빙이 녹는다.

5. Summary & Conclusion

- 이 연구에서는 해빙 모델의 강제력으로 사용되는 대기 재분석자료들에 포함된 불확실성과 이 불확실성이 해빙 부피 모사에 미치는 영향을 비교하였다.
- 강제력 변수들 중 열역학 변수들과 강수의 재분석자료 간 불확실성이 가장 두드러지게 나타났다.
- 복사 강제력에 포함된 불확실성에 의해 치환 실험들 중 가장 큰 폭으로 해빙 부피의 mean state가 달라진다. 온도 강제력에 포함된 불확실성은 해빙 부피의 interannual variability를 가장 크게 달라지게 만들었다. 이와 같은 열역학 강제력의 치환 실험에서는 해빙-알베도 피드백이 해빙 부피에 영향을 미치는 가장 주요한 메커니즘으로 작용하였다.
- Precipitation 강제력의 불확실성은 해빙부피의 annual cycle의 변동을 다르게 만들었으며 여기에는 눈의 절연효과가 주요하게 작용하였다.