Article

기후변화에 따른 북극해 빙해역 변화

권미옥¹ · 장찬주² · 이호진^{1*}

¹한국해양대학교 대학원 해양생명환경학과
(606-791) 부산광역시 영도구 동삼동 1

²한국해양연구원 기후·연안재해연구부
(425-600) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Projected Sea-ice Changes in the Arctic Sea under Global Warming

Mi Ok Kwon¹, Chan Joo Jang², and Ho Jin Lee^{1*}

¹*Division of Marine Environment & Bioscience
Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

²*Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : This study examines changes in the Arctic sea ice associated with global warming by analyzing the climate coupled general circulation models (CGCMs) provided in the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. We selected nine models for better performance under 20th century climate conditions based on two different criteria, and then estimated the changes in sea ice extent under global warming conditions. Under projected 21st century climate conditions, all models, with the exception of the GISS-AOM model, project a reduction in sea ice extent in all seasons. The mean reduction in summer (−63%) is almost four times larger than that in winter (−16%), resulting an enhancement of seasonal variations in sea ice extent. The difference between the models, however, becomes larger under the 21st century climate conditions than under 20th century conditions, thus limiting the reliability of sea-ice projections derived from the current CGCMs.

Key words : Arctic sea ice, CGCM, projection, global warming

1. 서 론

기후변화에 관한 정부간협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 발간한 제 4차 평가보고서(Assessment Report 4th, AR4)는 20세기 중반 이래로 전 지구 온도가 서서히 증가하고 있으며 앞으로 꾸준히 해빙이 감소하여 북극해 여름 해빙은 21세기 후반 소멸한다고 전망하였다. 하지만 기후모형에 따라 해빙의 변화 정

도는 각각 다르며, 기후모형들이 모사하고 있는 현재기후 해빙 면적의 양상별 평균은 관측과 비교적 일치하지만 각 모형 사이의 편차는 큰 것으로 나타났다(Arzel et al. 2006; Stroeve et al. 2007).

이전 연구에 따르면 21세기동안 지구온난화가 진행됨에 따라 여름의 해빙 면적이 크게 감소하면서 해빙 면적의 계절변화폭이 점차 증가하며 2100년경 해빙이 없는 여름 북극해를 전망하고 있다(Arzel et al. 2006; Gregory et al. 2002; Johannessen et al. 2004). 반면 Holland et al. (2006)은 2024년 이후 여름 해빙 면적의 감소가 가속화되

*Corresponding author. E-mail : hjlee@hhu.ac.kr

면서 2033년까지 10년 동안 $6 \times 10^6 \text{ km}^2$ 에서 $2 \times 10^6 \text{ km}^2$ 로 $4 \times 10^6 \text{ km}^2$ 의 해빙 면적이 소멸하여 2040년 이후에는 거의 얼음이 없는 환경이 된다고 보고한 바 있다. 한편 Overland and Wang (2007)은 해빙 면적의 변화에 있어 해역별 편차가 존재함을 보고하였다. 즉, 2050년 여름에 베링해, 오호츠크해, 바렌츠해 등의 해역에서 해빙 면적이 20세기 말에 비해 40% 정도 감소하는 반면, 배핀만과 래브라도해에서는 변화가 거의 없는 것으로 전망하였다.

하지만 이들 연구에서는 북극해 빙해역 변화 전망에 사용된 모형 결과에 대해 성능평가를 수행하지 않거나 또는 수행한 경우라도 성능평가 결과와 무관하게 모든 모형 결과를 이용하여 빙해역 변화를 전망하였다. 반면 Overland and Wang (2007)은 모형의 성능평가를 통해 해역별로 해빙 면적을 잘 모사한 모형을 선택하여 미래 전망을 계산하였지만 1979년부터 1999년까지의 21년 월평균 자료를 사용하여 모형 평가를 수행하였다.

기후변화에 대응하는 구체적인 대책을 마련하기 위해서는 예측의 정확도 개선과 더불어 기후모형 결과에 대한 정량적인 분석과 검증은 통한 모형의 신뢰도 평가도 수반되어야 한다. 또한 이전에 비해 더 많은 자료들이 축적되고 있는 만큼 신뢰도 평가에 있어서도 좀 더 장기간의 자료를 토대로 한 다양한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 IPCC AR4에 사용된 21개 기후모형에 대해 성능평가를

수행하고, 현재기후를 상대적으로 잘 모사한 모형만을 선택하여 기후 변화에 따른 북극해 빙해역의 변화를 계산하였다. 모형의 성능평가에 있어서 기존의 연구는 해빙 면적의 월평균 혹은 연평균 자료만을 이용하여 계산하였지만 본 연구에서는 월평균 자료 외에도 1900년부터 1999년까지 100년간의 월별 해빙 면적 시계열 자료를 분석함으로써 모형간의 차이가 분명히 나타나도록 하였다. 참고로 이전 연구에서는 20년간 평균된 3월, 9월 자료(Arzel et al. 2006) 혹은 21년간 평균된 월평균 자료(Overland and Wang 2007), 또는 54년간 평균된 3월, 9월 자료(Stroeve et al. 2007)를 사용하여 모사 능력을 평가하였다.

2장에서는 분석에 사용된 자료 및 분석방법에 대해 기술하였으며, 3장에서는 모사 평가를 통해 고성능 모형을 제시하고, 선택된 고성능 모형 결과를 이용하여 현재기후, 미래기후 조건에서의 빙해역 시공간 분포 및 빙해역의 미래 변화에 대해 살펴보았다.

2. 자료 및 분석방법

모형의 모사 능력 평가에는 IPCC AR4에 포함된 23개 모형 중 2개 모형(PCM, INGV_SXG)을 제외한 21개 모형을 사용하였다(Table 1). PCM 모형은 2100년 이후의 미래기후(SRES(Special Report on Emission Scenarios;

Table 1. 21 Coupled GCMs used in this study

No.	Model	Ocean model	Oceanic resolution	Ice dynamic, rheology
1	BCCR-BCM2.0	MICOM2.8	$0.5\text{-}1.5^\circ \times 1.5^\circ \text{ L35}$	Hibler (1979); Harder (1996)
2	CCSM3	POP	$0.3\text{-}1^\circ \times 1^\circ \text{ L40}$	Hunke and Dukowicz (1997)
3	CGCM3.1(T47)	MOM1.1	$1.9^\circ \times 1.9^\circ \text{ L29}$	Hibler (1979); Flato and Hibler (1990)
4	CGCM3.1(T63)	MOM1.1	$0.9^\circ \times 1.4^\circ \text{ L29}$	Hibler (1979); Flato and Hibler (1990)
5	CNRM-CM3	OPA8.1	$0.5\text{-}2^\circ \times 2^\circ \text{ L31}$	Hunke and Dukowicz (1997)
6	CSIRO-Mk3.0	MOM2.2	$0.8^\circ \times 1.9^\circ \text{ L31}$	Flato and Hibler (1990); O'Farrell (1998)
7	CSIRO-Mk3.5	MOM2.2	$0.8^\circ \times 1.9^\circ \text{ L31}$	Flato and Hibler (1990); O'Farrell (1998)
8	ECHAM5/MPI-OM	MPI-OM	$1.5^\circ \times 1.5^\circ \text{ L40}$	Hibler (1979)
9	ECHO-G	HOPE-G	$0.5\text{-}2.8^\circ \times 2.8^\circ \text{ L20}$	Hibler (1979)
10	FGOALS-g1.0	LICOM1.0	$1.0^\circ \times 1.0^\circ \text{ L16}$	Semtner (1976)
11	GFDL-CM2.0	OM3P4	$0.3\text{-}1.0^\circ \times 1.0^\circ \text{ L50}$	Hunke and Dukowicz (1997)
12	GFDL-CM2.1	OM3.1P4	$0.3\text{-}1.0^\circ \times 1.0^\circ \text{ L50}$	Hunke and Dukowicz (1997)
13	GISS-AOM	Russell et al. (1995); Russell (2005)	$3^\circ \times 4^\circ \text{ L16}$	Flato and Hibler (1990); Russell (2005)
14	GISS-ER	Russell et al. (1995)	$4^\circ \times 5^\circ \text{ L13}$	Russell et al. (1995)
15	INM-CM3.0	INMCM3	$2^\circ \times 2.5^\circ \text{ L33}$	Yakovlev (2003)
16	IPSL-CM4	OPA	$2^\circ \times 2^\circ \text{ L31}$	Hibler (1979)
17	MIROC3.2(hires)	COCO3.3	$0.2^\circ \times 0.3^\circ \text{ L47}$	Hunke and Dukowicz (1997)
18	MIROC3.2(medres)	COCO3.3	$0.5\text{-}1.4^\circ \times 1.4^\circ \text{ L43}$	Hunke and Dukowicz (1997)
19	MRI-CGCM2.3.2	Bryan-Cox	$0.5\text{-}2.0^\circ \times 2.5^\circ \text{ L23}$	Mellor and Kantha (1989)
20	UKMO-HadCM3	Bryan-Cox	$1.25^\circ \times 1.25^\circ \text{ L20}$	Bryan (1969)
21	UKMO-HadGEM1	Bryan-Cox	$0.3\text{-}1.0^\circ \times 1.0^\circ \text{ L40}$	Hunke and Dukowicz (1997)

Fig. 1. Study area for the north polar regions. Color shading indicates depth in m

Nakicenovic and Swart 2000) A1B) 자료만 있고 INGV_SXG 모형은 미래기후 자료의 시간정보가 정확하지 않아 분석에 사용하지 않았다. 모형에 관한 자세한 정보는 <http://www-pcmdi.llnl.gov>에서 찾을 수 있다.

본 연구에서는 기후모형의 모사 능력 평가에 있어 두 가지 기준을 적용하였다. 먼저 20C3M(20th Century Climate in Coupled Model) 결과 중 1900년부터 1999년까지의 100년 자료를 이용하여 북위 45° 이상 해역에서의 해빙 면적을 계산하였다(Fig. 1). 겨울과 여름의 해빙 면적을 각각 평가하였으며 겨울과 여름을 대표하는 기간으로 이전 연구들(e.g., Arzel et al. (2006); Stroeve et al. (2007))과 같이 해빙 면적이 최대와 최소가 되는 3월과 9월을 선정하였다. 해빙 면적은 Arzel et al. (2006)과 같이 해빙 농도가 15% 이상인 해역으로 정의하였다. 한계 농도를 15%로 택한 이유는 해빙농도가 15% 이상인 해역을 해빙 면적으로 계산할 경우에 인공위성 관측과 지상 관측 해빙 면적이 가장 잘 일치하기 때문이다(Walsh and Chapman

2001). 계산된 해빙 면적을 HadISST(Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set; Rayner et al. 2003) 해빙 관측 자료와 비교하여 오차범위 20% 이내 ($100 \pm 20\%$)에 속하는 모형을 선별하였다. 이 방법은 해빙 면적 절대값만을 비교하므로 해빙 면적의 계절변화 위상, 진폭 등의 오차에 대한 평가는 할 수 없다.

따라서 두 번째 방법으로 테일러 다이어그램을 이용하여 모형의 계절변화와 오차를 평가하였다. 테일러 다이어그램은 상관계수, 표준편차, 평방 제곱근 오차(root mean square error, 이하 RMSE)를 동시에 평가할 수 있으므로 모형을 다양한 관점에서 평가할 수 있다(Taylor 2001). 테일러 다이어그램 분석을 통해 상관계수 0.9 이상, 표준편차 15% 이내($100 \pm 15\%$)를 동시에 만족시키는 모형을 선별하였다. 두 가지 기준을 모두 충족하는 모형을 고성능 모형으로 정의하여 기후변화에 따른 북극해 빙해역의 변화를 계산하였다. 일반적으로 현재기후 또는 미래기후에 따른 해빙 면적을 계산할 때 해빙 면적의 내부 변동성의 효과를 제거하기 위하여 20년 혹은 30년의 자료를 평균하여 사용한다. 이전 연구의 경우 현재기후를 20세기 말 20년(Arzel et al. 2006)이나 21년(Overland and Wang 2007; Zhang and Walsh 2006), 혹은 26년(Lefebvre and Goosee 2008) 등을 사용해 왔다. 따라서 본 논문에서는 현재기후는 20C3M 결과 중 20세기 마지막 20년인 1980년부터 1999년까지, 미래기후는 SRES A1B 시나리오 결과 중 21세기 마지막 20년인 2080년부터 2099년까지의 자료로 정의하였으며 기후변화에 따른 빙해역의 변화는 각 기간의 3월, 9월의 해빙 면적의 차이(A1B-20C3M)로 계산하였다.

3. 결 과

현재기후 모사 능력 평가

Fig. 2는 21개 모형이 모사한 북극해 빙해역 해빙 면적을 나타낸다. FGOALS-g1.0(#10) 모형은 해빙 면적을 관

Fig. 2. Arctic sea ice area averaged over the 1900-1999 period. Black and white bars indicate winter (March) and summer (September), respectively. The standard deviation from the mean is also shown. Ave represents a 20-model ensemble averaged value, excepting the FGOALS-g1.0 model (#10). Horizontal lines show $\pm 20\%$ of the observed sea ice area (HadISST)(black: winter, red: summer)

Fig. 3. Taylor diagram for monthly data over the 1900-1999 period simulated by 21 models. Numbers indicate each of the models listed in Table 1. The filled red triangle denotes the observed value

측에 비해 겨울은 약 2배, 여름은 약 3.5배 정도 크게 모사하고 있어 모형 평균값(Ave)에는 포함시키지 않았다. 20개 모형의 평균 해빙 면적은 관측(HadISST)에 비해 겨울은 약 4% 크게, 여름은 약 6% 작게 나타나 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

하지만 각 모형의 모사 능력은 유의하게 다르게 나타났다. 겨울의 경우 해빙 면적이 관측의 약 88%(GISS-AOM(#13))에서 140%(GFDL-CM2.0(#11))까지 모사하고 있으며 MIROC3.2(medres)(#18) 모형이 약 0.08%의 오차로 관측과 가장 비슷하다. 관측의 20%의 범위 내에서 모사하고 있는 모형은 모두 18개(#1, #2, #3, #4, #5, #6, #7, #8, #9, #13, #14, #15, #16, #17, #18, #19, #20, #21)이다. 여름의 경우에는 관측의 약 47%(MIROC3.2(hires)(#17))에서 137%(GISS-ER(#14))까지 모사하고 있어 겨울에 비해 편차가 더 큰 것으로 나타났다. 결국 여름의 해빙 모사 결과가 모형 평가에 있어 겨울에 비해 더 제한적인 요소로 작용할 수 있음을 시사한다. 관측과 가장 비슷하게 모사한 모형은 겨울과 마찬가지로 MIROC3.2(medres)(#18) 모형으로 0.5%의 오차를 나타냈다. 여름의 해빙 면적을 관측의 20%의 범위 내에서 모사하고 있는 모형은 모두 14개(#1, #2, #3, #4, #5, #7, #8, #9, #11, #13, #16, #18, #19, #21)이다. 겨울과 여름 두 계절 모두에서 관측의 20% 범위 내에서 해빙 면적을 모사한 모형은 모두 13개(#1, #2, #3, #4, #5, #7, #8, #9, #13, #16, #18, #19, #21)이다.

다음으로 21개 모형이 모사한 1900년부터 1999년까지의 월별 해빙 면적 자료를 이용하여 테일러 다이어그램

분석을 수행하였다. Fig. 3은 테일러 다이어그램 분석을 통해 계산된 각 모형과 관측간의 상관관계, 표준편차 및 RMSE를 나타낸다. 원점과 번호로 표시된 각 점 사이의 거리, 즉 반지름은 관측값으로 정규화된 표준편차를 의미한다. 또한 방위각은 상관계수를 의미하며 각 점에서 ▲로 표시된 지점까지의 거리는 RMSE에 해당된다. FGOALS-g1.0(#10) 모형과 ECHO-G(#9) 모형을 제외한 나머지 19개 모형의 상관계수는 0.9 이상이었으며 그 중 표준편차가 관측의 15%(0.85-1.15) 내에 속하는 모형은 #1, #3, #4, #5, #7, #8, #13, #16, #18 등 총 9개이다.

결과적으로 겨울과 여름 두 계절 모두 관측의 20% 범위에서 해빙 면적을 모사한 13개 모형 중 CCSM3(#2), ECHO-G(#9), MRI-CGCM2.3.2(#19) 및 UKMO-HadGEM1(#21)의 4개 모형을 제외한 9개 모형이 상관계수가 0.9 이상, 표준편차가 관측의 15% 범위 내에 속하는 것으로 나타났다. 제외된 4개 모형을 살펴보면 CCSM3(#2), ECHO-G(#9), UKMO-HadGEM1(#21) 모형은 해빙 면적을 겨울은 각각 11%, 4%, 10% 만큼 높게, 여름은 각각 6%, 12%, 10% 만큼 낮게 모사되었다. 즉, 계절변화폭이 다른 모형에 비해 크게 모사되고 있으며 그에 따라 표준편차가 상대적으로 크게 계산된 것으로 사료된다. ECHO-G(#9) 모형은 상관계수 또한 낮게 나타났다. MRI-CGCM2.3.2(#19) 모형은 겨울과 여름 모두 12%, 10% 높게 모사하였는데 표준편차가 기준보다 약간 크게 나타나 제외되었다.

최종적으로 두 가지 기준을 모두 만족하는 9개 모형(BCCR-BCM2.0(#1), CGCM3.1(T47)(#3), CGCM3.1(T63)(#4), CNRM-CM3(#5), CSIRO-Mk3.5(#7), ECHAM5/MPI-OM(#8), GISS-AOM(#13), IPSL-CM4(#16), MIROC3.2(medres)(#18))을 고성능 모형으로 정의하였으며 앞으로 제시되는 모든 모형 결과는 이 고성능 모형만의 앙상블 평균값이다. 이렇게 정의된 9개 모형의 평균 해빙 면적은 관측에 비해 겨울에 2% 크고, 여름에 1% 작아 앞서 언급한 20개 모형 앙상블 평균보다 50% 이상 관측에 더 가깝게 되었다.

현재기후(1980-1999)

Fig. 4는 20C3M 결과 중 1980년부터 1999년까지의 20년 평균 해빙 농도의 공간 분포를 나타낸다. Fig. 4(a)는 겨울과 여름의 관측(HadISST) 값이며 Fig. 4(b)는 모형 결과이다. 겨울의 경우 오토츠크해, 베링해, 바렌츠해 및 래브라도해에서, 여름의 경우 바렌츠해와 카라해 주변 해역에서 해빙 농도가 관측보다 0.2 이상 크게 나타났다. 즉 겨울과 여름 모두 빙해역의 경계 부근에서 관측과의 차이가 상대적으로 크게 존재하는 것으로 확인되었다.

모형에 따른 해빙 농도 분포 차이를 살펴보기 위하여 모형간 표준편차 분포를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 겨울의

Fig. 4. Monthly mean distribution of sea ice concentration averaged over 1980-1999. (a) HadISST data, (b) ensemble means of the 9 selected models

Fig. 5. (a) standard deviation and (b) normalized standard deviation of sea ice concentration simulated by 9 models over the 1980-1999 period

경우 래브라도해에서 해빙 농도 편차가 최대 0.5로 가장 크게 나타났으며 그린란드 주변해역과 오희츠크해에서도 편차가 약 0.4에 달한다. 한편 여름의 경우에는 그린란드와 추크치해 주변해역을 제외한 대부분의 빙해역 경계에서 편차가 약 0.3까지 증가했다.

전체적으로 해빙 농도는 겨울에는 높고 여름에는 낮은 특성을 가진다. 따라서 계절에 따른 해빙 농도의 변화 효

Fig. 6. (a) monthly mean distribution of sea ice concentration averaged over 2080-2099, (b) standard deviation and (c) normalized standard deviation of sea ice concentration simulated by 9 models

과를 제외한 모형간 해역별 편차만을 살펴보기 위하여 표준편차를 9개 모형 평균 해빙 농도 값으로 나누어 정규화하였다(Fig. 5(b)). 정규화된 표준편차 분포는 겨울과 여름 모두 빙해역의 경계로 갈수록 차이가 커지는 분포를 보였다. 하지만 겨울에는 대부분의 빙해역 경계에서 모형간의 차이가 앙상블평균의 1.5배에 달할 만큼 큰 반면 여름에는 바렌츠해 주변 해역이 상대적으로 크고 나머지 해역에서는 대부분 평균의 1.1배 미만으로 나타났다. 이 결과를 해빙 농도의 분포(Fig. 4(b))와 비교해 보면 해빙 농도가 0.2 이하로 낮은 빙해역의 경계에서 모형간의 차이가 증가하는 것을 알 수 있다.

미래기후(2080-2099)

Fig. 6은 SRES A1B 시나리오 결과 중 2080년부터 2099년까지의 20년 평균 해빙 농도의 공간 분포(Fig. 6(a)) 및 모형간 표준편차(Fig. 6(b))와 정규화된 표준편차(Fig. 6(c))를 나타낸다. 겨울의 해빙 농도(Fig. 6(a))를 살펴보면 현재기후(Fig. 4(b))에 비해 베링해, 오희츠크해,

바렌츠해, 허드슨만 등의 해역에서 해빙 농도가 0.3 내외로 감소하였지만 북극해 중앙부의 경우 해빙 농도가 전혀 감소하지 않았다. 반면 여름의 경우에는 북극해 중앙부에서 해빙 농도가 현재기후에 비해 0.6 내외로 크게 감소했으며 해빙의 범위도 축소된 것을 확인할 수 있다.

모형간 표준편차(Fig. 6(b))를 보면 겨울의 경우 바렌츠해와 그린란드해, 래브라도해 및 허드슨만 등의 해역에서 모형간 편차가 약 0.4 내외로 가장 크게 나타났으며 북극해 중앙부에는 모형간 편차가 없는 것을 알 수 있다. 현재기후 조건에서 모형간 편차가 크게 나타났던 오흐츠크해와 베링해에서는 대부분의 해빙이 소멸되면서 편차도 감소하였다. 여름의 경우에는 북극해 중앙부에서 편차가 거의 존재하지 않았던 현재기후와는 달리 약 0.4 내외의 편차를 보인다. 즉 현재기후의 조건에서는 모든 모형이 여름에도 북극해 중앙부의 해빙 농도를 1.0으로 전망하기 때문에 편차가 없지만 기후변화에 따라 해빙 농도가 감소하면서 모형별로 해빙 농도의 변화 크기를 다르게 전망함에 따라 편차가 증가한 것으로 생각된다. 반면 빙해역의 경계에서는 모형간 편차가 0.2 내외로 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 빙해역 경계 해역에서 상대적으로 해빙 농도가 크게 감소하여 해빙 농도 값이 작아지면서 모형간 편차 또한 작게 계산된 것으로 사료된다.

정규화된 표준편차(Fig. 6(c))를 보면 겨울의 경우 현재기후(Fig. 5(b))와 마찬가지로 빙해역의 경계로 갈수록, 또한 해빙 농도가 낮을수록 모형간의 차이가 커진다. 반면 여름의 경우 현재기후에 비해 범위가 매우 축소되면서 북극해 중앙부에서 모형간 차이가 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 미래기후와 현재기후의 해빙 면적의 월별 변동을 나타낸다. 계절에 상관없이 북극해 해빙 면적이 감소하는데 특히 겨울에 비해 여름의 감소율이 큰 것을 확인할 수 있다. 9개 모형의 평균 해빙 면적 변화는 겨울에 약 $-2 \times 10^6 \text{ km}^2$, 여름에 약 $-5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 로 이는 각각 현재의 해빙 면적에 비해 16%, 63% 정도의 감소를 의미한다. 연평균 해빙 면적의 변화는 약 $-3 \times 10^6 \text{ km}^2$ (-27%)로 확인되었다. 여름의 해빙 면적이 겨울에 비해 4배 이상 크게 감소함에 따라 계절변화폭이 현재기후에 비해 30% 이상 증가하였다. 참고로 그림에는 표시하지 않았지만 2개 모형(CNRM-CM3(#5), MIROC3.2(medres)(#18))이 여름에 해빙이 거의 존재하지 않는 북극을 전망하였다. 하지만 그 외의 모형은 모두 여름에도 해빙이 존재하는 것으로 전망하였으며 따라서 2100년경 해빙이 없는 여름 북극해를 전망한 다른 연구 결과(Arzel et al. 2006; Gregory et al. 2002; Johannessen et al. 2004)와는 다소 다른 전망을 제시한다.

기후변화에 따른 해빙 농도 변화율의 공간분포를 살펴

Fig. 7. Mean Seasonal variation of sea ice area averaged over the periods 1980-1999 and 2080-2099

Fig. 8. (a) sea ice concentration difference due to climate change (A1B-20C3M) divided by the results of 20C3M and (b) its normalized standard deviation

보기 위하여 Fig. 8(a)에 해빙 농도의 변화량을 현재기후의 해빙 농도로 나눈 그림을 나타냈다. 겨울의 경우 북극해 중앙부에서는 해빙 농도가 감소하지 않았으며 허드슨만에서는 약 20%, 그린란드 해에서는 약 50% 정도의 감소율을 나타냈다. 반면 노르웨이해와 오흐츠크해, 베링해 및 북대서양 등의 해역에서는 100%에 가까운 감소를 보였다. 여름의 경우에는 북극해 중앙부에서도 50% 이상의 큰 감소율을 보였으며 허드슨만과 그린란드해, 노르웨이해 및 추크치해 등의 해역에서는 해빙 농도가 100% 감소하였다.

모형간 차이를 살펴보면(Fig. 8(b)) 빙해역의 경계로 갈수록, 또한 해빙 농도가 상대적으로 낮은 해역일수록 모형간의 편차가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 겨울에

는 래브라도해와 그린란드 주변해역 및 오호츠크해에서 모형간의 편차가 평균 해빙 농도 차이의 약 1.5배까지 증가하며 여름에는 바렌츠해 주변에서 모형간 편차가 가장 크게 나타났다. 빙해역의 경계 해역은 상대적으로 해양 순환에 의한 열수송이 영향을 크게 미치는 해역이다. 따라서 이러한 모형간 편차의 특징은 모형별 해양 순환 모사의 차이에 기인하는 것으로 생각할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 IPCC AR4에 포함된 21개 기후모형 결과를 이용해 각 모형의 모사 능력을 평가하고 북극해 빙해역 현재기후를 상대적으로 잘 모사한 9개 모형을 추출하여 기후변화에 따른 북극해 빙해역의 변화를 계산하였다. 모형의 모사 능력을 좀 더 엄격하게 평가하기 위하여 장기간의 월별 자료를 사용하여 기존 연구에서 주로 사용한 평균 해빙 면적과 더불어 계절변화 위상, 진폭, 평방 제곱근 오차도 비교 평가하였다.

북극해 빙해역 면적은 현재기후 조건에서 겨울에 비해 여름에 모형간의 차이가 약 2배 정도 더 큰 것으로 나타났다. 이는 현재 해빙 모사 능력이 겨울보다 여름에 더 제한적임을 의미한다. 모형 평가를 통해 선택한 9개 모형의 평균 해빙 면적은 관측에 비해 겨울에는 2% 크게, 여름에는 1% 작게 모사되었다. 이러한 결과는 모든 모형 결과를 단순 평균했을 때에 비해 50% 이상 관측에 더 가까운 값이며 따라서 본 논문에서 선택한 모형의 모사 능력 평가 기준이 효과적임을 보여주는 결과로 판단된다. 해빙 두께나 부피 등의 변수에 대해서도 모사 능력을 평가할 수 있다면 좀 더 다양한 측면에서 고성능 모형을 정의할 수 있겠지만 아직까지는 모형 결과와 비교할 수 있는 장기간 관측 자료가 존재하지 않아 평가가 제한적인 실정이다. 향후 장기간 관측 두께 자료 등이 확보가 된다면 더 다양한 조건의 모사 평가를 통해 보다 정확한 고성능 모형을 정의할 수 있을 것으로 사료된다.

기후변화에 따른 빙해역 변화를 살펴본 결과 겨울의 경우 빙해역 경계 해역에서는 해빙 농도가 감소하였지만 북극해 중앙부에서는 변화가 없었다. 반면 여름의 경우에는 북극해 중앙부에서도 해빙 농도가 50% 이상 크게 감소하였다. 하지만 2100년경 해빙이 없는 여름 북극해를 전망한 기존 연구와는 달리 7개 모형이 여름에도 북극해 중앙부에는 해빙이 존재하는 것으로 전망하였다. 9개 모형 평균 해빙 면적의 변화량은 겨울과 여름 각각 $-2 \times 10^6 \text{ km}^2$ (-16%), $-5 \times 10^6 \text{ km}^2$ (-63%)로 겨울에 비해 여름에 4배 이상 크게 감소하였다. 따라서 해빙 면적 계절변화폭이 현재기후에 비해 30% 이상 증가하는 것으로 전망되었다.

고성능 모형을 정의했음에도 불구하고 빙해역의 경계에

서의 모형간 편차가 상대적으로 크게 나타났으며 편차가 모형 평균값보다 큰 경우도 존재하였다. 이러한 모형별 편차의 원인을 밝히기 위해서는 각 모형의 특성 및 해빙 이외의 결과에 대한 모형별 차이를 살펴보는 것이 필요하다. 하지만 현재로는 각 모형에 대한 충분한 정보들을 얻는데 어려움이 있어 본 연구에서는 수행할 수 없었으며 향후 보다 상세한 모형 정보들이 파악되는 대로 모형간 편차 원인에 대한 분석을 수행할 예정이다. 특히 각 모형별 해면수온 및 해류 재현 특성을 비교함으로써 빙해역 변화 전망에 있어 모형간 편차의 원인뿐만 아니라 해양이 해빙 변동에 미치는 영향 또한 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발” 중 “빙해선박 선체구조 안정성 평가 기술 [1세부과제(10033640)]” 과제, 국토해양부 “북태평양 기후변동 수치모델링 연구(PM55640)”, 기상청 “지구시스템 모듈 원천기술 개발을 위한 해빙 및 해양 생지화학 과정 개발(PN64860)”의 지원으로 수행되었습니다. 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원님들께도 감사드립니다.

참고문헌

- Arzel O, Fichefet T, Goosse H (2006) Sea ice evolution over the 20th and 21st centuries as simulated by current AOGCMs. *Ocean Modell* 12:401-415
- Bryan K (1969) A numerical method for the study of the circulation of the world oceans. *J Comput Phys* 4:347-376
- Flato GM, Hibler WD (1990) On a simple sea-ice dynamics model for climate studies. *Ann Glaciol* 14:72-77
- Gregory JM, Stott PA, Cresswell DJ, Rayner NA, Gordon C, Sexton DMH (2002) Recent and future changes in Arctic sea ice simulated by the HadCM3 AOGCM. *Geophys Res Lett*, 29(24), doi:10.1029/2001GL014575
- Harder M (1996) Dynamik, Rauigkeit und Alter des Meereises in der Arktis. Ph.D. thesis, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, Germany. 124 pp
- Hibler WD (1979) A dynamic thermodynamic sea ice model. *J Phys Oceanogr* 9:815-846
- Holland MM, Bitz CM, Tremblay B (2006) Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice. *Geophys Res Lett* 33:L23503, doi: 10.1029/2006GL028024

- Hunke EC, Dukowicz JK (1997) An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics. *J Phys Oceanogr* **27**:1849-1867
- Johannessen OM, Bengtsson L, Miles MW, Kuzmina SI, Semenov VA, Alekseev GV, Nagurnyi AP, Zakharov VF, Bobylev LP, Pettersson LH, Hasselmann K, Cattle HP (2004) Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability. *Tellus* **56A**:328-341
- Lefebvre W, Goosse H (2008) Analysis of the projected regional sea-ice changes in the Southern Ocean during the twenty-first century. *Climate Dyn* **30**:59-76
- Mellor G, Kantha L (1989) An ice-ocean coupled model. *J Geophys Res* **94**:10937-10954
- Nakicenovic N, Swart R (2000) Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, 612 p
- O'Farrell SP (1998) Investigation of the dynamic sea-ice component of a coupled atmosphere sea-ice general circulation model. *J Geophys Res* **103**(C8):15751-15782
- Overland JE, Wang M (2007) Future regional Arctic sea ice declines. *Geophys Res Lett* **34**:L17705, doi:10.1029/2007GL030808
- Rayner NA, Parker DE, Horton EB, Folland CK, Alexander LV, Rowell DP, Kent EC, Kaplan A (2003) Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res* **108**(D14):4407, doi:10.1029/2002JD002670
- Russell GL (2005) 4×3 Atmosphere-Ocean Model Documentation. <http://aom.giss.nasa.gov/doc4x3.html>. Accessed 7 Jul 2010
- Russell GL, Miller JR, Rind D (1995) A coupled atmosphere-ocean model for transient climate change studies. *Atmos Ocean* **33**:683-730
- Semtner AJ Jr (1976) A model for the thermodynamic growth of sea-ice in numerical investigations of climate. *J Phys Oceanogr* **6**:379-389
- Stroeve J, Holland MM, Meier W, Scambos T, Serreze M (2007) Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophys Res Lett* **34**:L09501. doi:10.1029/2007GL029703
- Taylor KE (2001) Summarizing multiple aspects of model performance in single diagram. *J Geophys Res* **106**:D7, 7183-7192
- Walsh JE, Chapman WL (2001) 20th-century sea-ice variations from observational data. *Ann Glaciol* **33**:444-448
- Yakovlev N (2003) Coupled model of ocean general circulation and sea ice evolution in the Arctic Ocean. *Izv Atmos Ocean Phys* **39**:355-368
- Zhang X, Walsh JE (2006) Toward a seasonally Ice-Covered Arctic Ocean: Scenario from the IPCC AR4 Model Simulation. *J Clim* **19**:1730-1747

Received Sep. 15, 2010

Revised Oct. 27, 2010

Accepted Dec. 10, 2010