

전구 해빙모델(CICE)을 이용한 해빙 농도와 해빙 두께 민감도 비교

이수봉 · 안중배*

부산대학교 지구환경시스템학부

(접수일: 2014년 10월 5일, 게재확정일: 2014년 12월 4일)

Sensitivity Study of Simulated Sea-Ice Concentration and Thickness Using a Global Sea-Ice Model (CICE)

Su-Bong Lee and Joong-Bae Ahn*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 5 October 2014; accepted 4 December 2014)

Abstract The impacts of dynamic and thermodynamic schemes used in the Community Ice Code (CICE), the Los Alamos sea ice model, on sea ice concentration, extent and thickness over the Arctic and Antarctic regions are evaluated. Using the six dynamic and thermodynamic schemes such as sea ice strength scheme, conductivity scheme, albedo type, advection scheme, shortwave radiation method, and sea ice thickness distribution approximation, the sensitivity experiments are conducted. It is compared with a control experiment, which is based on the fixed atmospheric and oceanic forcing. For sea ice concentration and extent, it is found that there are remarkable differences between each sensitivity experiment and the control run over the Arctic and Antarctic especially in summer. In contrast, there are little seasonal variations between the experiments for sea ice thickness. In summer, the change of the albedo type has the biggest influence on the Arctic sea ice concentration, and the Antarctic sea ice concentration has a greater sensitivity to not only the albedo type but also advection scheme. The Arctic sea ice thickness is significantly affected by the albedo type and shortwave radiation method, while the Antarctic sea ice thickness is more sensitive to sea ice strength scheme and advection scheme.

Key words: CICE, sea ice modeling, sensitivity test

1. 서 론

기후 시스템에서 해빙의 역할은 매우 중요하다. 양극지방의 해빙은 알베도가 크기 때문에 지표로 유입되는 복사량을 조절하고(e.g., Perovich et al., 2002; Brandt et al., 2005; Kim et al., 2006; Francis et al., 2009), 절연기능이 있어 대기와 해양의 열교환을 늦추며(e.g., Pringle et al., 2007), 유동성이 있기 때문에 운동에

너지 전달을 막는 역할도 수행한다(e.g., Vancoppenolle et al., 2009). 해빙의 생성 및 소멸과정에서 나타나는 염분과 담수의 방출은 전지구 열염순환까지 영향을 미친다(e.g., Aagaard and Carmack, 1989; Goosse and Fichefet, 1999; Vancoppenolle et al., 2006).

이러한 해빙의 변화에 영향을 미치는 요소는 무엇인가? 선행연구들은 이를 위하여 해빙모델을 사용하여 각 요소에 대한 반응 실험을 수행하였다. Kim et al. (2006)은 Los Alamos sea ice model (Community Ice Code, CICE) 단일 모델 내의 22가지 모수를 변화시켜 해빙 두께에 대한 반응을 1981년부터 1986년까지 재현실험을 통해 살펴보았다. 그 결과 해빙 두께는 얼음 밀도에 가장 민감하며 여름철에는 알베도

*Corresponding Author: Joong-Bae Ahn, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea.
Phone : +82-51-510-2290, Fax : +82-51-515-1689
E-mail : jbahn@pusan.ac.kr

Table 1. Experimental designs for CICE sensitivity tests.

| Experimental Name | | Selected option | Control |
|-------------------|--|---|---|
| OPT1 | Ice strength formulation | Ice strength formulation (Hibler, 1979) | Ice strength formulation (Rothrock, 1975) |
| OPT2 | Conductivity | Conductivity of Pringle et al. (2007) | Conductivity of Maykut and Untersteiner (1971) |
| OPT3 | Albedo type | Four constant albedos | NCAR CCSM3 albedos |
| OPT4 | Advection | Donor cell advection | Linear remapping advection |
| OPT5 | Shortwave | Delta-eddigton method | NCAR CCSM distribution method |
| OPT6 | Ice thickness distribution approximation | Linear remapping ice thickness distribution approximation | Delta function ice thickness distribution approximation |

와 복사율이, 겨울철에는 눈의 밀도가 북극과 남극 일대 해빙의 두께에 가장 중요한 요소라고 결론지었다. Miller et al. (2006, 2007)은 북극의 해빙 두께를 최적으로 모델링하기 위해 CICE의 알베도와 해빙 강도 모수 등을 조절하였다. 대부분의 선행연구들은 Surface Heat Budget of the Arctic (SHEBA) 프로그램(Uttal et al., 2002)과 같은 관측 프로그램에서 관측된 수치에 맞도록 모델 내의 모수들을 조절하는 작업들을 수행해왔다(Hunke and Lipscomb, 2004). 그러나 최적 모수는 모델에 사용된 대기와 해양의 강제력, 계절, 남반구인지 북반구인지에 따라 달라질 수 있다(Hunke, 2010; Utolia et al., 2012).

본 연구에서는 전지구 해빙모델 CICE의 해빙 농도와 해빙 두께 모사 특성 이해에 중점을 두었다. 이를 위하여 대기와 해양의 강제력을 고정한 상태에서 CICE의 6가지 역학적, 열역학적 요소들(해빙 강도, 전도율, 알베도 종류, 이류, 단파복사, 해빙 두께분포 근사)을 조절하여 각 요소가 해빙 농도와 해빙 두께의 변화에 미치는 영향과 그 민감도를 북극과 남극에 대하여 각각 살펴보고자 한다.

2. 실험 설계

2.1 해빙모델(CICE) 및 실험설계

본 연구에서는 전지구 해빙모델 CICE를 각 요소별 해빙 농도와 해빙 두께의 민감도 실험에 사용하였다. CICE는 전지구 대기-해양-해빙-지면 접합모델이나 전지구 해양-해빙 모델의 성분으로, 또는 단일모델로도 사용될 수 있는 해빙 모델이다. CICE는 열역학 모델, 해빙역학 모델, 수송모델과 얼음산맥(ridging) 모수화 부분 등으로 구성되어 있다(<http://oceans11.lanl.gov/trac/CICE/wiki/SourceCode>). 또한 이 모델은 3극 격자(tripolar grid)를 채택하고 있다. 본 연구에서는 경도 방향으로 100개, 위도 방향으로 116개의 격자 시스템(약 $3^\circ \times 3^\circ$)으로 실험하였다. 대기 경계조건으로는 LANL에서 제공하는 NCAR의 1997년 단파복사, 장파

복사, 강수, 기온, 바람, 습도, 비습을 사용하였다. 해양 경계조건으로는 모델 내부에서 상수로 정해진 해수온과 염분 등을 사용하였다.

먼저 해빙이 없는 상태로부터 시작하여 100년 동안 스핀업을 실시하였다. 이 스핀업이 끝난 후의 해빙 초기조건을 사용하여 6가지 요소(해빙 강도, 전도율, 알베도 종류, 이류, 단파복사, 해빙 두께분포 근사)에 대한 민감도 테스트를 위해 추가적으로 50년 동안의 적분을 수행하였다. 이 때 경계조건은 스핀업에서 사용한 것과 동일한 자료를 사용하였다. 본 연구에서 제어한 6가지 요소와 특징은 Table 1에 나타내었다.

2.2 해빙모델 제어 요소

2.2.1 해빙 강도

CICE에서 해빙 강도는 Rothrock (1975)과 Hibler (1979)의 방법을 따라 계산할 수 있다. Rothrock (1975)는 해빙 강도가 위치 에너지의 변화에 비례한다고 가정한다. 반면 Hibler (1979)는 평균 해빙 두께와 압축강도(compactness)를 이용하여 압축에 의해 해빙이 얇아지면 해빙의 강도가 더욱 강해지는 것을 표현하였다.

2.2.2 전도도(conductivity)

전도도는 Maykut and Untersteiner (1971)의 방법과 Pringle et al. (2007)의 방법으로 계산할 수 있다. Maykut and Untersteiner (1971)은 fresh ice의 전도도와 염분, 해수온의 함수로 전도도를 계산한다. 반면 Pringle et al. (2007)의 “bubbly brine” 모델은 북반구 해빙 전도도를 관측한 경험치를 바탕으로, 해빙과 순수 얼음의 밀도와 염분, 해수온의 함수로 전도도를 계산한다. Maykut and Untersteiner (1971)의 전도도는 온도가 낮아질수록 온도에 따른 변화가 적어져 특정 값($2.03 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)에 수렴하는 반면, Pringle et al. (2007)의 방법에 따르면 온도가 낮아질수록 전도도가 거의 선형적으로 증가한다.

2.2.3 알베도 타입

NCAR CCSM3의 알베도 모수화는 표면의 상태에 따라 알베도를 조절하는 방법이다. 예를 들면 건조한 눈의 알베도는 관측보다 약 0.07 낮게 조절되어서 상대적으로 단파복사가 불충분한 계절에도 해빙이 녹을 수 있도록 한다(Collins et al., 2006). 반면 눈과 얼음의 온도에 따라 4개의 카테고리 나누어 알베도를 상수로 지정하는 방법도 있다(four constant albedos). 따뜻한 얼음, 따뜻한 눈, 차가운 얼음, 차가운 눈의 알베도는 각각 0.68, 0.77, 0.70, 0.81로 지정된다.

2.2.4 이류

선형 재사상 이류(linear remapping advection) 방안은 원래 해양의 수평 수송을 위해 만들어진 방안을 다중 카테고리, 다층의 해빙 수송을 계산하기 위해 차용한 것이다(Lipscomb and Hunke, 2004). 이 선형 재사상 이류 방안은 보존적이고, 호환성이 높고 빨리 수렴하기 때문에 계산 효율이 높다. Donor cell 이류 방안은 각 격자 내의 상태는 균일하다는 가정에서 만들어진, 플럭스가 보존되는 방안이다. 보존적이고 빠르지만 분산적(diffusive)이라는 단점이 있다.

2.2.5 단파복사

NCAR CCSM3 방안(Briegleb et al., 2004)은 기온, 해빙과 눈의 두께, 유입된 태양 복사의 스펙트럼을 이용하여 알베도를 정한다. 이 NCAR CCSM3 방안은 관측치에 상응하는 알베도를 설정한다. 예를 들면 차가운 눈(-1°C)의 알베도는 가시광선과 근적외선에서 각각 0.98과 0.70이다. 4개 복사 카테고리(direct and diffuse visible, direct and diffuse near infrared)의 플럭스를 합하여 총 흡수된 단파플럭스를 계산한다. 반면 Delta-Eddington 방안(Joseph et al., 1976)은 눈, 순수한 얼음, 융해 연못(melt pond)의 세 가지 카테고리 해빙 표면을 나누어서 산란과 흡수를 결정하는 계수들을 처방하여 알베도와 단파플럭스를 간접적으로 계산한다.

2.2.6 해빙 두께 분포 근사

해빙 두께 분포는 몇 개의 해빙 두께 카테고리로서 수치적으로 이산화된다. 해빙 두께 카테고리의 식은 Bitz et al. (2001)과 Lipscomb (2001)를 따른다. Bitz et al. (2001)은 격자 안에서 해빙의 성장속도나 녹는 속도가 너무 빠를 때 두께 재사상 방법 대신, 격자에서의 두께 카테고리를 델타 함수(delta function)를 이용해 계산하는 방법을 고안하였다. Lipscomb (2001)은 해빙 두께가 선형 함수인 선형 두께 재사상(linear thickness remapping) 방법을 제안했다. 델타 함수를 이용하여 계산하는 방법보다 덜 분산적이며, 다른 해

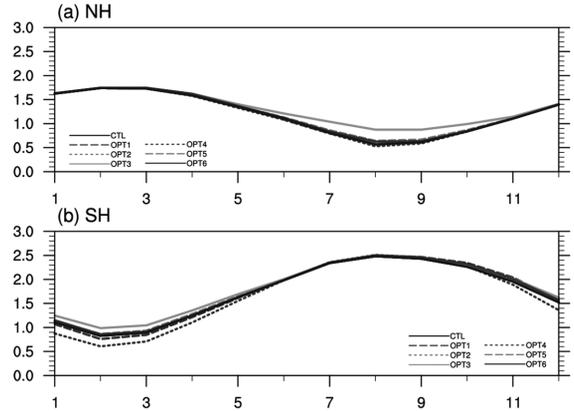


Fig. 1. Seasonal cycles of total sea ice area over (a) the north hemisphere (NH) and (b) the south hemisphere (SH) for 50th year of sensitivity experiments.

빙 두께 분포를 다루는 방안들과 비교하여 빨리 수렴하여 계산비용이 적다는 이점이 있다.

3. 해빙 민감도 분석

3.1 해빙 농도 및 해빙면적 민감도

해빙면적(sea ice extent)은 해빙으로 뒤덮인 면적으로 정의한다. 관측과 모델의 경우 각 격자의 해빙 농도가 해빙면적의 기준이 된다. 본 연구에서는 해빙 농도가 15% 이상인 영역의 면적을 해빙면적으로 간주하였다. 이는 National Snow Ice Data Center에서 사용되고 있으며 해빙면적을 계산할 때 가장 일반적으로 쓰이는 기준이다. 100년의 스핀업 기간 동안 CICE가 모사하는 북극과 남극의 해빙면적은 계절에 따라 변화하였다. 스핀업 기간 동안 북극과 남극의 해빙면적 범위는 각각 약 $0.5\sim 1.8 \times 10^7 \text{ km}^2$ 과 약 $0.8\sim 2.5 \times 10^7 \text{ km}^2$ 로, 남극이 북극보다 상대적으로 해빙면적의 변동폭이 크게 나타난다. 민감도 테스트의 처음 수 년 동안은 각 변경한 요소에 반응하여 해빙 면적이 증가 혹은 감소하기 시작하여 민감도 테스트의 50년째 되는 해에는 모든 실험들이 안정한 계절변동을 보인다.

Figure 1은 각 요소별 민감도 테스트 50년째의 월별 해빙면적 시계열이다. 해빙면적이 넓어지는 시기에는 각 요소별로 차이가 나타나지 않지만, 양 반구의 여름, 즉 해빙이 녹는 시기에 대해서 각 요소별로 해빙면적의 차이가 나타났다. 관측치에서는 9월에 북극에서는 최소 해빙면적이, 남극에서는 최대 해빙면적이 나타나지만 본 실험에서는 한 달 빠른 8월에 북극과 남극의 해빙면적 최소와 최대가 나타났다. 해빙 모델은 대기와 해양 경계조건의 영향을 많이 받기 때문에 8월에 남극과 북극의 해빙면적 최대와 최소가

Table 2. Differences as a percentage of mean sea ice area between OPTs and CTL over the north hemisphere (NH) and the south hemisphere (SH) during summer and winter of each hemisphere. Double asterisks (**) represent statistical significance over 99% confidence level.

| Area [%] | NH | | SH | |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Summer (JAS) | Winter (JFM) | Summer (JFM) | Winter (JAS) |
| OPT1 | -0.2** | 0.2 * | -5.4** | 0.9** |
| OPT2 | 3.9** | 0.0** | 1.7** | 0.1** |
| OPT3 | 40.2** | 0.5** | 16.1** | 0.7 * |
| OPT4 | -4.0** | 0.1** | -22.4** | 1.0** |
| OPT5 | 9.1** | 0.3** | 3.9** | 0.4** |
| OPT6 | 5.5** | 0.6** | 3.5** | 0.7** |

나타나는 것은 경계조건의 영향이라고 보인다.

Table 2에는 각 요소별 북반구와 남반구의 여름철과 겨울철 평균 해빙면적이 기준실험과 얼마나 차이가 나는지를 백분율로 나타내었다. 특히 알베도를 제어한 OPT3 실험은 기준실험과 비교하여 북반구 여름

철 해빙 면적을 40.2% 더 넓게 모사하였다. OPT4와 OPT1는 여름철 북극 해빙면적을 기준실험보다 좁게, 그 외의 실험들은 넓게 모사하였지만 기준실험과의 차이는 유의하지 않다. 6가지 요소 모두 북반구 겨울철 해빙면적에 대하여 기준실험과 유의한 차이를 보이지 않았다. 남반구의 여름철에 OPT3은 CTL과 비교하여 해빙면적을 16.1% 더 넓게 모사하였으며, 그 반면 OPT4는 이 시기의 남극 해빙면적을 22.4% 좁게 모사하였다. 그림으로 나타내지는 않았지만 해빙 강도 요소를 조절한 OPT1의 경우 남극 해빙면적이 감소하는 시기(10월부터 12월)에는 기준실험보다 천천히 해빙면적이 줄어들다가 그 속도가 기준실험보다 점점 빨라져서 면적이 최소인 2월에는 기준실험보다 오히려 더 해빙면적이 좁게 나타난다.

Figures 2와 3은 각 요소별로 어느 영역에 대해 민감도를 보이는가를 기준실험과의 차를 통해 나타내었다. Table 2에서 살펴본 바와 같이 해빙 농도는 각 반구의 여름철에만 기준실험과의 차이가 나타나며 겨울철에는 크게 차이 나지 않았다. 4개의 상수로 알베도를 썼을 때(OPT3) NCAR CCSM3 알베도를 사용한

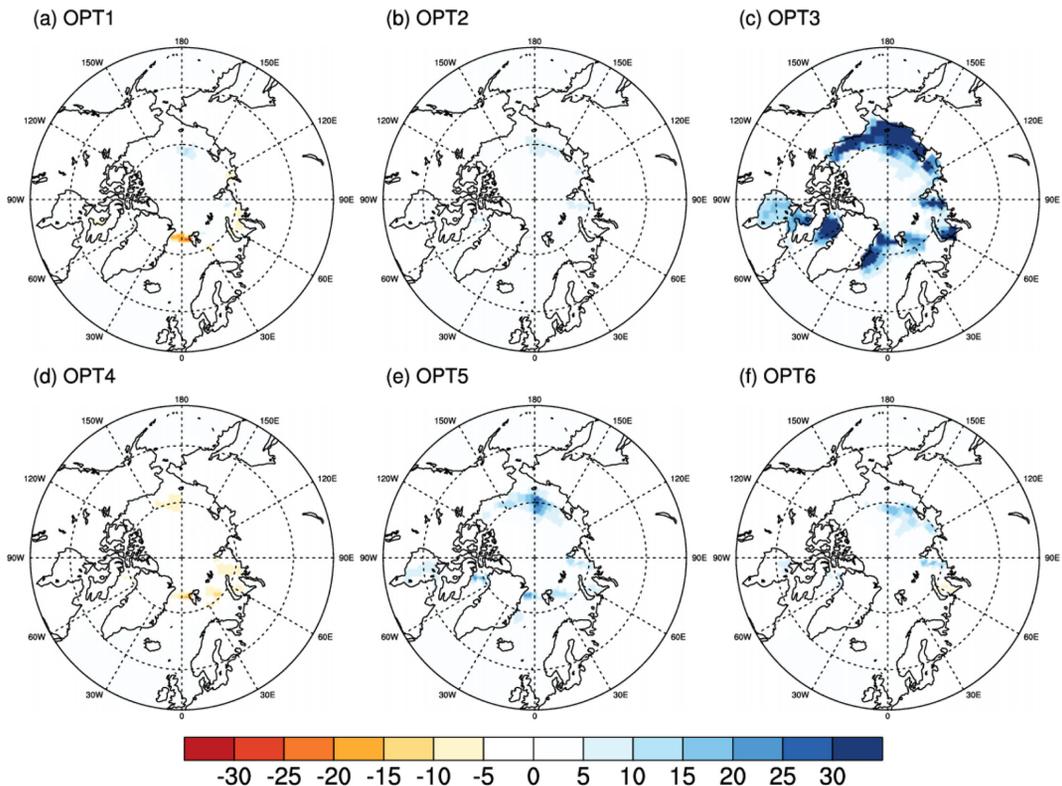


Fig. 2. Differences of sea ice concentration [%] between each experiment (OPTs) and control (CTL) in the north hemisphere for summer (JAS).

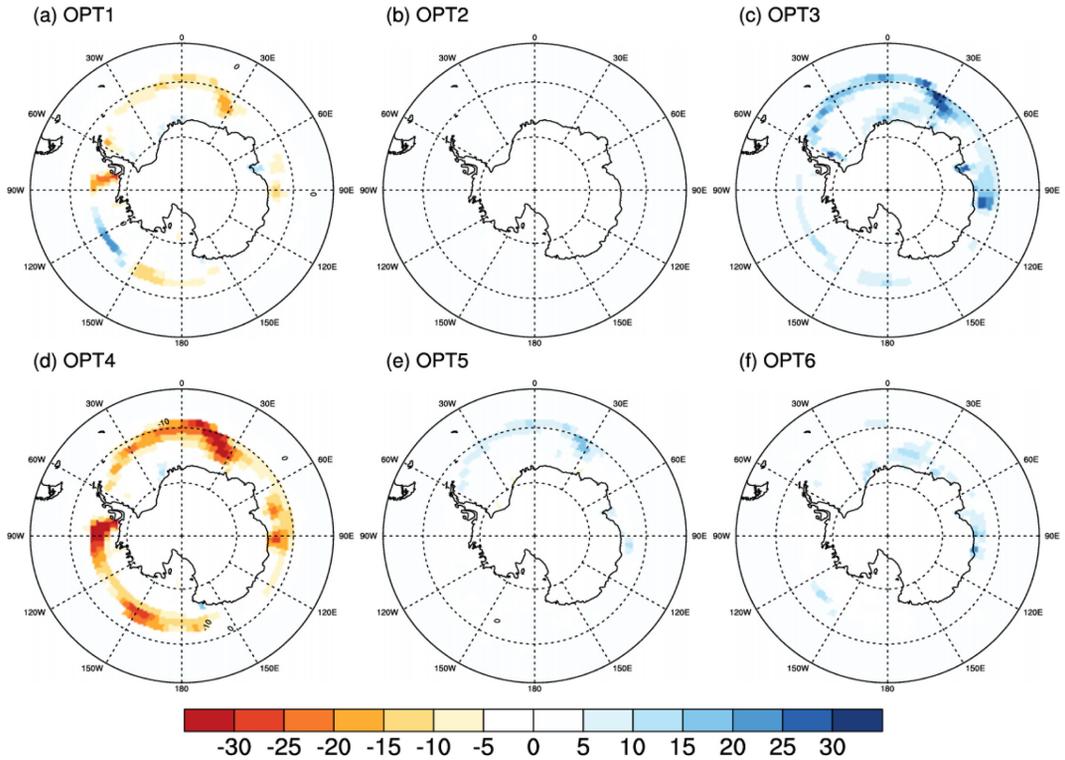


Fig. 3. Differences of sea ice concentration [%] between each experiment and control (CTL) in the south hemisphere for summer (JFM).

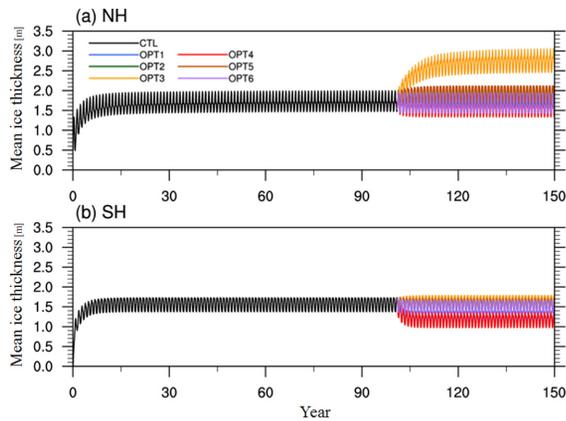


Fig. 4. Time series for mean ice thickness [m] for 100 years of spinup and 50 years of 6 sensitivity experiments and a control experiment.

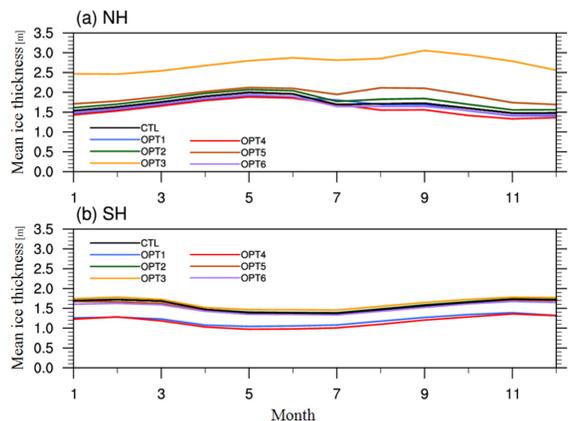


Fig. 5. Seasonal cycles of mean ice thickness [m] over (a) NH and (b) SH for 50th year of sensitivity experiments.

규준실험보다 북극과 남극의 해빙 농도를 전체적으로 증가시킨다. 반면 Donor cell을 이류 방안으로 선택한 OPT4는 남반구 여름철 해빙을 규준실험(선형 재사상 방안) 보다 해빙 농도를 더 낮게 모사한다.

3.2 해빙 두께 민감도

Figure 4는 100년의 스핀업과 그 이후 50년 동안의 6개 민감도 실험의 해빙 두께 시계열을 나타내었다. 해빙이 없는 상태에서 스핀업을 시작하였기 때문에 양극의 평균 해빙 두께는 0 m로부터 계절에

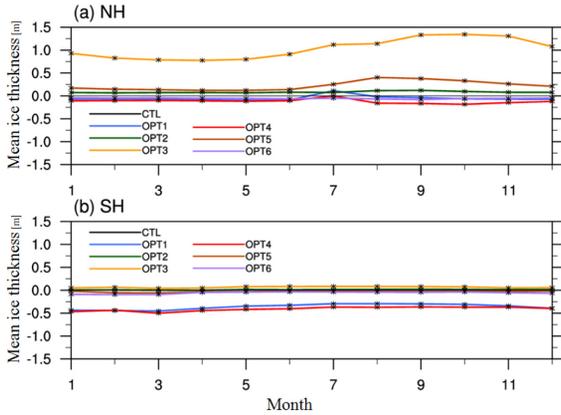


Fig. 6. Differences of mean sea ice thickness [m] between experiments (OPTs) and CTL over (a) NH and (b) SH for 50th year of sensitivity experiments.

따라 변동하면서 증가한다. 100년 스핀업이 끝난 후 해빙 두께는 약 1.67 m로 수렴된다. 민감도 실험에서 해빙 두께는 해빙면적과 비교하여 각 요소별로 반응이 큰 폭으로 나타났다.

Table 3. Differences as a percentage of mean sea ice thickness between OPTs and CTL over the north hemisphere (NH) and south hemisphere (SH) during summer and winter of each hemisphere. Double asterisks (**) represent statistical significance over 99% confidence level.

| Thickness [%] | NH | | SH | |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Summer (JAS) | Winter (JFM) | Summer (JFM) | Winter (JAS) |
| OPT1 | 1.1 * | -4.2 * | -26.1** | -20.1** |
| OPT2 | 6.1 * | 4.3 * | 0.3 * | 1.3 * |
| OPT3 | 69.8** | 51.4** | 3.1 * | 5.6 * |
| OPT4 | -6.2 * | -6.3 * | -27.5** | -25.0** |
| OPT5 | 20.2** | 9.2** | -2.6 * | -0.8 * |
| OPT6 | -3.7 * | -2.6 * | -5.3 * | -2.8 * |

Figure 5는 민감도 실험 50년째의 각 요소별 해빙 두께의 변동을 나타내었다. 평균 해빙 두께는 연중 두께의 최대값이 나타난다. 북극에서는 5월과 9월에 최대값이 나타나고 남극에서는 11월부터 3월까지 상대적으로 두꺼운 해빙을 유지한다. 해빙 농도와 해빙 두께의 최대가 나타나는 시기는 약간의 시간차가 있다.

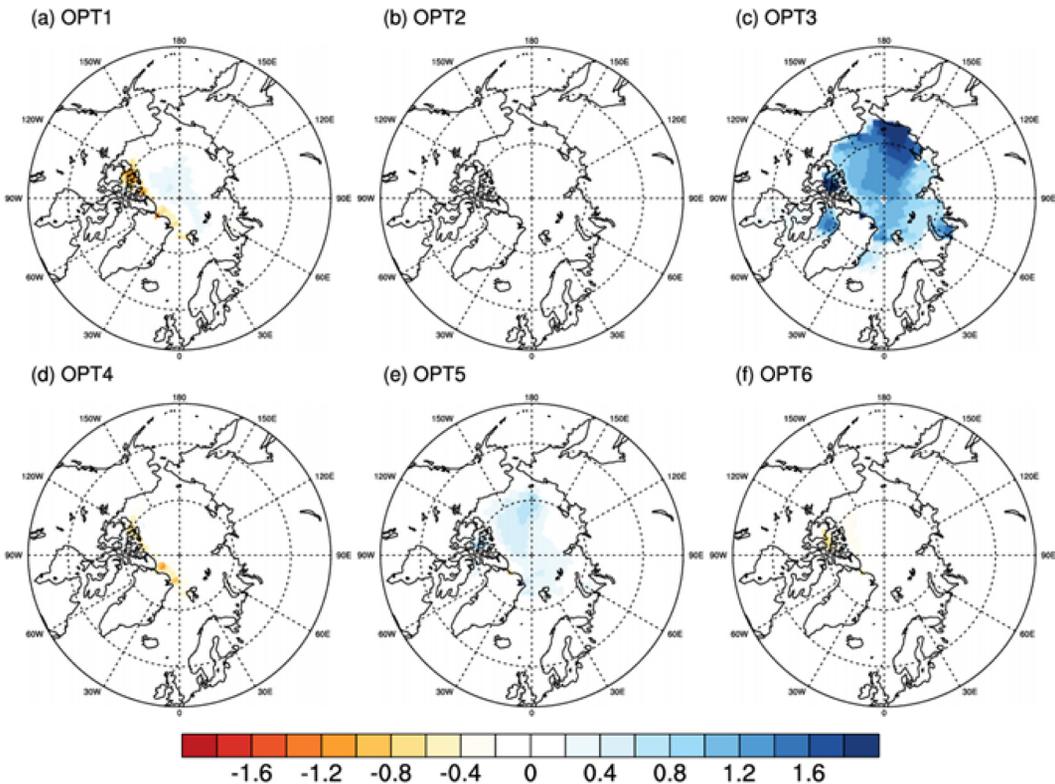


Fig. 7. Differences of sea ice thickness [m] between each experiment (OPTs) and control (CTL) in the north hemisphere for summer (JAS).

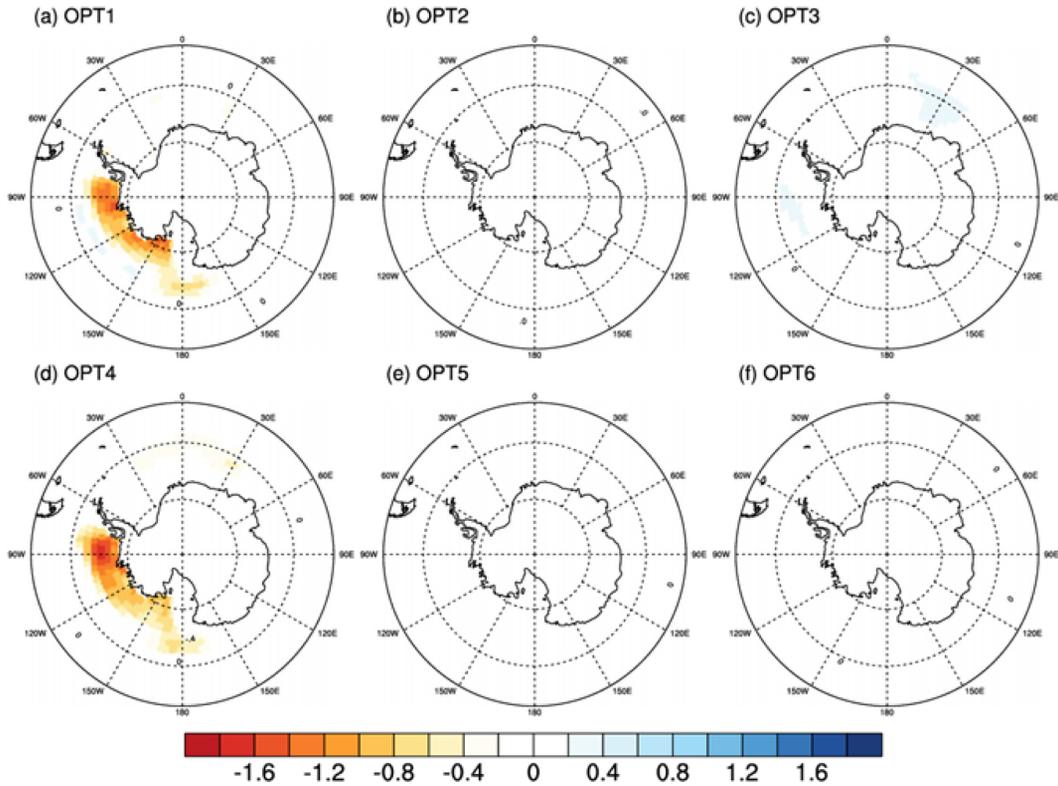


Fig. 8. Differences of sea ice thickness [m] between each experiment (OPTs) and control (CTL) in the south hemisphere for winter (JAS).

각 민감도 실험별 기준실험과의 차이를 Fig. 6에 나타내었다. 해빙 농도는 여름철에 기준실험과 큰 차이를 보이는 반면, 상대적으로 해빙 두께는 연중 일정하게 기준실험과 차이를 보인다. Table 3은 기준실험과의 평균 해빙 두께의 차이를 백분율로 나타내어 북극과 남극의 계절별로 나타내었다. 각 요소들 중 OPT3에서 북극의 해빙 두께가 가장 두껍게 나타나서 기준실험과 비교하여 여름철과 겨울철 해빙 두께를 각각 69.8%와 51.4% 더 두껍게 모사하였다. 그 다음으로 OPT5가 기준실험과 비교하여 여름철과 겨울철에 각각 20.2%와 9.2%의 더 두껍게 해빙을 모사하였다. 반면, 남극에서는 OPT1과 OPT4가 해빙 두께를 얇게 만드는 요소로 나타났다.

Figures 7과 8은 해빙 두께에 대하여 각 요소별 민감도 실험과 기준실험의 차이가 어느 지역에서 나는지를 나타내었다. Figure 7c OPT3에서는 북극해 전체의 해빙 두께가 두꺼워졌고, 주로 추코트 해와 동시베리아 해안의 해빙을 기준실험보다 더 두껍게 모사하였다. 또한 Fig. 7e OPT5에서는 주로 추코트 해와 보퍼트 해의 해빙이 두꺼워졌다. Figure 8a OPT1과

Fig. 8d OPT4는 기준실험과 비교하여 남극서부의 아문센해의 해빙을 얇게 모사하였다. 그럼으로 나타내지는 않았지만 각 민감도 실험별 기준실험과의 해빙 두께 차이는 계절별 차이가 크지 않다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 전지구 해빙모델의 6가지 요소(해빙 강도, 전도율, 알베도 종류, 이류, 단파복사, 해빙 두께분포 근사)를 조절함으로써 북극과 남극 해빙 농도와 해빙면적, 해빙 두께에 미치는 효과를 살펴보았다.

해빙 농도는 북극과 남극의 여름철에 각 요소의 변화에 대한 반응이 민감하게 나타나며 겨울철에는 각 민감도 실험과 기준실험의 차이가 통계적으로 유의하지 않다. 해빙 농도와 해빙면적은 북반구 여름철에는 알베도에 민감하게 반응하였으며, 남반구 여름철에는 알베도와 이류방안에 따라 민감하게 반응하였다. 반면 해빙 두께는 계절의 변화에 크게 민감하게 반응하지 않았다. 북극의 해빙 두께는 알베도와 단파복사 방안에 민감하게 반응하였고, 남극의 해빙 두께는 해빙

강도 방안과 이류 방안에 민감하게 반응하였다.

북극과 남극에서 해빙 농도와 해빙 두께에 대하여 민감하게 반응하는 요소가 다른 것은 북극과 남극의 지역적 특성과 해빙 생성 및 소멸 메커니즘이 다르기 때문이다. 남극 대륙은 열린 바다로 둘러싸여 있어서 해빙의 움직임이 자유롭고 빠르다. 남극에서는 겨울에 생성된 대부분의 해빙이 여름에 녹아서 소멸된다. 이러한 이유로 남극의 해빙 농도와 두께는 모두 이류 방안의 조절에 다른 요소보다 크게 반응하였다. 반면 북극해는 육지로 둘러싸여 있다는 지리적인 특징이 있어서 북극의 해빙은 남극의 해빙보다 상대적으로 수명이 길다. 이러한 지리적 특성 때문에 북극의 해빙 농도와 두께는 이류방안의 조절에 의한 영향을 상대적으로 남극보다 덜 받으며, 또한 북극해에 머무는 시간이 길기 때문에 알베도의 변화에 좀 더 민감하게 반응하는 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상연구소 주관의 “관측·지진 기술 지원 및 활용연구”와 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ009953)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Aggaard, K., and E. C. Carmack, 1989: The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *J. Geophys. Res.*, **94**, 14485-14498, doi:10.1029/JC094iC10p14485.
- Bitz, C. M., M. M. Holland, A. J. Weaver, and M. Eby, 2001: Simulating the ice-thickness distribution in a coupled climate model. *J. Geophys. Res.*, **106**, 2441-2463.
- Brandt, R. E., S. G. Warren, A. P. Worby, and T. C. Grenfell, 2005: Surface albedo of the Antarctic sea ice zone. *J. Climate*, **18**, 3606-3622.
- Briegleb, B. P., C. M. Bitz, E. C. Hunke, W. H. Lipscomb, M. M. Holland, J. L. Schramm, and R. E. Moritz, 2004: Scientific description of the sea ice component in the community climate system model, version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-463+STR, NCAR Tech Note, 1-78.
- Collins, W. D., and Coauthors, 2006: The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3). *J. Climate*, **19**, 2122-2143.
- Francis, J. A., W. Chan, D. J. Leathers, J. R. Miller, and D. E. Veron, 2009: Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L07503, doi:10.1029/2009GL037274.
- Goosse, H., and T. Fichefet, 1999: Importance of ice-ocean interactions for the global ocean circulation: A model study. *J. Geophys. Res.*, **104**, 23337-23355, doi:10.1029/1999JC900215.
- Hibler, W. D., 1979: A dynamic thermodynamic sea ice model. *J. Phys. Oceanogr.*, **9**, 817-846.
- Hunke, E. C., 2010: Thickness sensitivities in the CICE sea ice model. *Ocean Modell.*, **34**, 137-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.05.004>.
- _____, and W. H. Lipscomb, 2004: CICE: The Los Alamos Sea Ice Model, documentation and software, version 3.1, LA-CC-98-16, 56 pp., Los Alamos Natl. Lab., Los Alamos, N. M.
- Joseph, J., W. Wiscombe, and J. Weinman, 1976: The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2452-2459.
- Kim, J. G., E. C. Hunke, and W. H. Lipscomb, 2006: Sensitivity analysis and parameter tuning scheme for global sea-ice modeling. *Ocean Modell.*, **14**, 61-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2006.03.003>.
- Lipscomb, W. H. 2001: Remapping the thickness distribution in sea ice models. *J. Geophys. Res.*, **106**, 13989-14,000.
- _____, and E. C. Hunke, 2004: Modeling sea ice transport using incremental remapping. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1341-1354.
- Maykut, G. A., and N. Untersteiner, 1971: Some results from a time dependent thermodynamic model of sea ice. *J. Geophys. Res.*, **76**, 1550-1575.
- Miller, P. A., S. W. Laxon, D. L. Feltham, and D. J. Cresswell, 2006: Optimization of a sea ice model using basinwide observations of Arctic sea ice thickness, extent, and velocity. *J. Climate*, **19**, 1089-1108.
- _____, S. W. Laxon, and D. L. Feltham, 2007: Consistent and contrasting decadal Arctic sea ice thickness predictions from a highly optimized sea ice model. *J. Geophys. Res.*, **112**, 1-16.
- Perovich, D. K., T. C. Grenfell, B. Light, and P. V. Hobbs, 2002: Seasonal evolution of the albedo of multiyear Arctic sea ice. *J. Geophys. Res.*, **107**, 8044. doi:10.1029/2000JC000438.
- Pringle, D. J., H. Eicken, H. J. Trodahl, and L. G. E. Backstrom, 2007: Thermal conductivity of landfast Antarctic and Arctic sea ice. *J. Geophys. Res.*, **112**, C04017, doi:10.1029/2006JC003641.
- Brandt, R. E., G. W. Stephen, P. W. Anthony, and C. G. Thomas, 2005: Surface Albedo of the Antarctic Sea Ice Zone. *J. Climate*, **18**, 3606-3622. doi:http://

- dx.doi.org/10.1175/JCLI3489.1.
- Rothrock, D. A., 1975: The energetics of the plastic deformation of pack ice by ridging. *J. Geophys. Res.*, **80**, 4514-4519.
- Uotila, P., S. O'Farrell, S. J. Marsland, and D. Bi, 2012: A sea-ice sensitivity study with a global ocean-ice model. *Ocean Modell.*, **51**, 1-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.04.002>.
- Uttal, T., and Coauthors, 2002: Surface Heat Budget of the Arctic Ocean. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 255-276
- Vancoppenolle, M., T. Fichefet, H. Goosse, S. Bouillon, G. Madec, and M. A. Morales Maqueda, 2009: Simulating the mass balance and salinity of Arctic and Antarctic sea ice. 1. Model description and validation. *Ocean Modell.*, **27**, 33-53, doi:10.1016/j.ocemod.2008.10.005.