CICE5 열역학 방안 및 해양경계조건에 따른 북극해 해빙 반응 차이 해석

이수봉 [1,2], 김주홍 [1], 김백민 [1], 안중배 [2]

[1] 극지연구소 북극해빙예측사업단

[2] 부산대학교 대기환경과학과

1. Introduction

- 해빙 내의 염분은 해빙의 열적인 성질을 다르게 만든다. 해빙 내의 염분이 높고 낮음에 따라서, 혹은 해빙 내 염분의 연직 프로파일의 모양에 따라서도 해빙의 열적인 성질이 달라진다 (Vancoppenolle et al., 2005). 해빙모델에서 이러한 해빙의 열적인 특징을 다루는 부분이 바로 열역학 방안이다. 해빙모델의 모사특성을 정확하게 이해하기 위해서는 각 열역학 방안에 대해 충분히 파악할 필요가 있다.
- Turner and Hunke (2015)는 CICE5 해빙모델의 두 열역학 방안, Bitz and Lipscomb (1999; BL99)와 Mushy layer 열역학 방안 (Feltham et al., 2006; MUSHY)의 모사 특성을 비교하였다. 두 열역학방안을 구분 짓는 가장 큰 차이는 염분에 관한 처리 (염분의 예단적 계산, 중력 배수 (gravity drainage), 용융 연못(melt pond)에서의 배수과정) 라는 점을 밝혔다. 이를 위해 CORE의 대기 경계조건과 1990년대의 해양경계조건을 사용하였다. 그러나 Turner and Hunke (2015)의 실험에서 전제한 바와 달리, 실제 북극의 해양은 지속적으로 온난화되고 있다.
- 본 연구는 다른 해양상태에 대하여 두 열역학방안이 어떤 과정을 통하여 얼마나 민감하게 반응하는지 살펴보고자 한다.

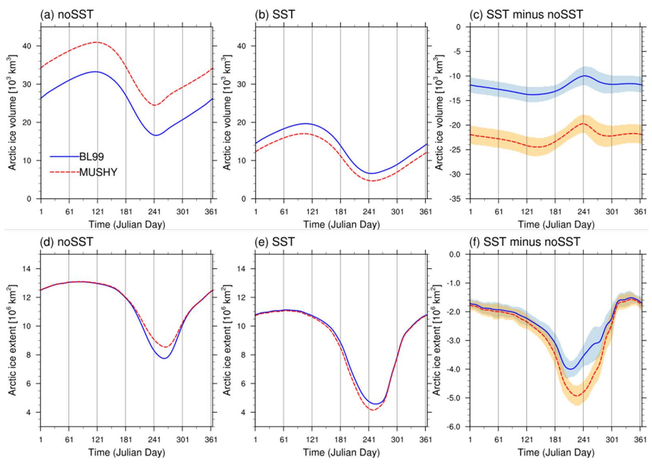
2. Method

Model	CICE5.1.2 stand alone		
Resolution	Horizontal resolution	gx1 version6 (displaced pole grid)	
	Vertical resolution	7 ice layer 1 snow layer 5 thickness category	
Thermodynamics	**BL99**	Bitz and Lipscomb thermodynamic model (Bitz and Lipscomb, 1999)	
	MUSHY	Mushy layer thermodynamic model (Feltham et al., 2006)	
Dynamics	Elastic-anisotropic-plastic (Tsamados et al., 2013)		
Initial condition	starting from no ice		
Boundary condition	Atmospheric	Interannual Forcing from Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (CORE) version 2.0 (1958-2007)	
	Ocean	**noSST**	default SST and default Sea Surface Salinity
		SST	HadISST and default Sea Surface Salinity

- noSST 실험은 해양경계조건을 직접 처방하지 않지만 열린 바다를 통해 유입되는 대기 플럭스를 이용하여 해수면온도가 계산된다. 반면 SST 실험은 해양경계조건인 HadISST와 대기 플럭스를 함께 고려하여 해수면온도가 계산된다.
- 본 연구는 다른 해양경계조건 (noSST/SST)에 대하여 두 열역학 방안 (BL99와 MUSHY)을 사용한 해빙 재현실험을 수행하고 각각의 반응을 비교하였다.

3. Results

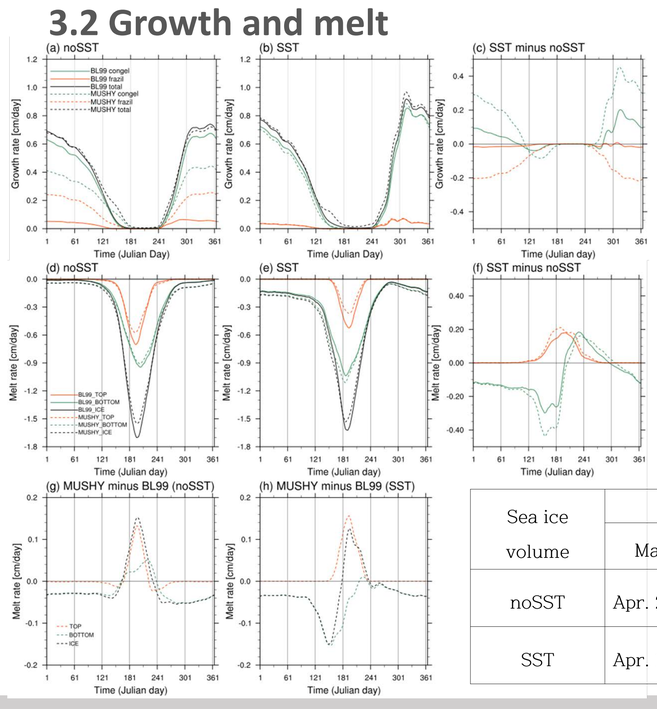
3.1 Sea ice volume and extent



◀ **Figure 1**

- MUSHY의 해빙부피는 해양경계조건에 따라 BL99보다 더 크게 반응한다. noSST 실험에서 MUSHY의 해빙부피는 BL99와 비교하여 더 크다. 반면 SST 실험에서는 noSST 실험보다 연평균적인 해빙부피가 감소하였고, MUSHY의 해빙부피는 BL99와 비교하여 더 작다.
- 해양경계조건이 따뜻해짐에 따라 5월부터 10월까지 MUSHY의 해빙면적 감소가 BL99보다 더 두드러지게 나타난다.

3.2 Growth and melt



▼ **Table 1** 해빙부피의 최대와 최소 시기의 차이를 용융 기간 (melt period)으로 정의하였다.

- 따뜻한 해양경계조건인 경우 차가운 해양상태보다 상대적으로 전체 용융 기간이 길며, MUSHY에서 더 크게 반응한다.

◀ **Figure 2** 해빙의 생성과 용융

- 해양경계조건이 따뜻해짐으로 인해 전체적인 용융 양이 증가하였고 본격적인 용융의 시작시기가 앞당겨졌다. 해양경계조건이 따뜻해질 때 MUSHY는 겨울철 해빙의 성장과 여름철 해빙의 용융에 대해서 BL99보다 더 큰 폭으로 변화하였다.

Sea ice volume	BL99			MUSHY		
	Max	Min	Melt Period	Max	Min	Melt Period
noSST	Apr. 28th	Sep. 4th	129	Apr. 29th	Sep. 2th	126
SST	Apr. 18th	Sep. 5th	140	Apr. 13th	Sep. 6th	146

4. Top and bottom process

4.1 Top process

Figure 3 Melt pond area

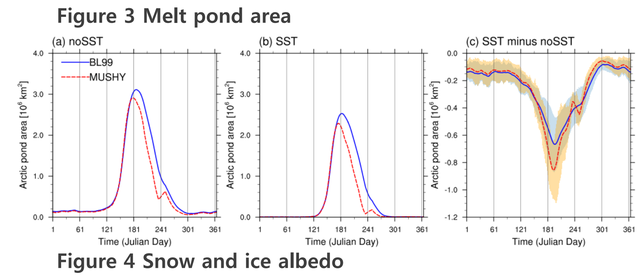


Figure 4 Snow and ice albedo

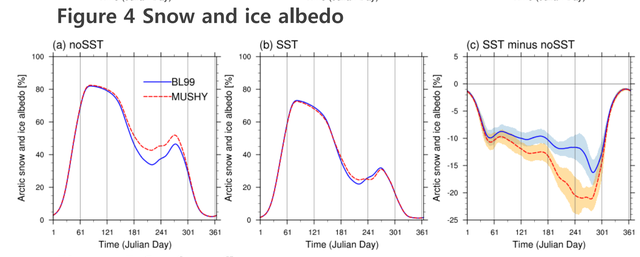
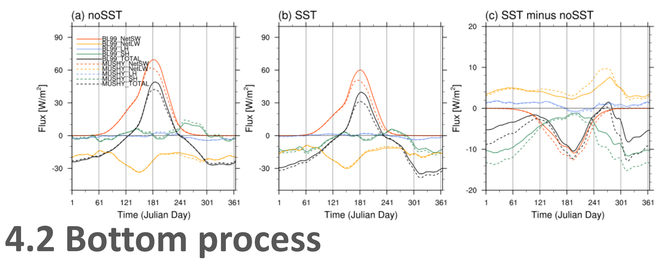


Figure 5 Surface flux



◀ **Figure 3~5**

- MUSHY 열역학 방안은 중력배수 과정을 통해 여름철 해빙의 표층에 존재하는 용융 연못의 면적을 상대적으로 좁게 모사하고 빨리 소멸하게 만든다.
- 용융 연못의 면적은 알베도를 조절하여 여름철 유입되는 단파복사를 상대적으로 적게 만든다. 이러한 과정을 통해 여름철 표층에서의 용융은 BL99보다 MUSHY에서 덜 일어난다.
- 이 차이는 SST 실험과 noSST 실험 모두에서 유사한 정도로 나타난다.

4.2 Bottom process

Figure 6 Heat flux between sea ice bottom and ocean

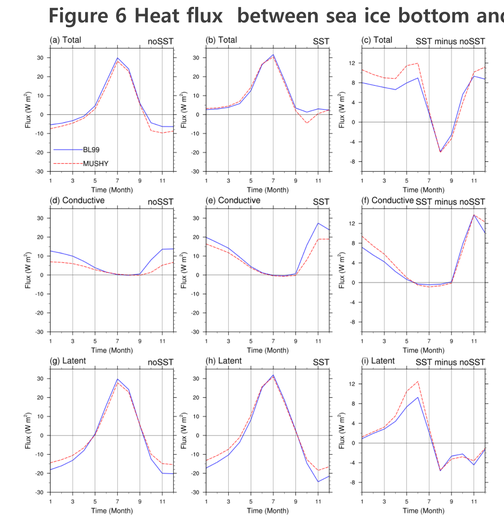
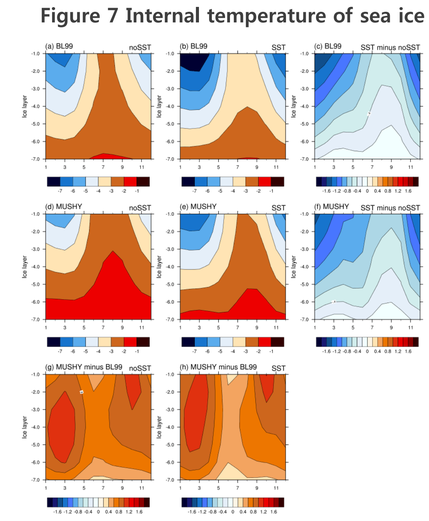


Figure 7 Internal temperature of sea ice



▲ **Figure 6** 해양과 해빙 바닥 사이의 열 플럭스는 다음과 같이 전도열, 잠열, 현열의 합으로 나타낼 수 있다.

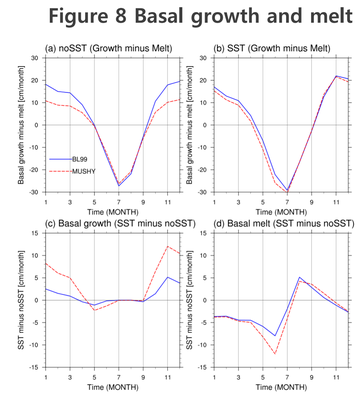
$$F_w = k_{si}\frac{\partial T}{\partial z} + \rho_{si}L_{si}\frac{\partial H}{\partial t} - \rho_{si}C_{si}\frac{\partial T}{\partial t}\Delta H$$

k_{si}: 해빙의 전도율
ρ_{si}: 해빙의 밀도
L_{si}: 해빙의 잠열
C_{si}: 해빙의 비열

이 중 현열은 값이 상대적으로 작기 때문에 전도열과 잠열만 Figure 6에 나타내었다. 두 열역학방안 모두 해양경계조건이 따뜻할 때 늦여름부터 초가을을 제외한 모든 기간에서 해양으로부터 해빙이 받는 열 플럭스가 증가하였다.

▶ **Figure 7** 전도열은 해빙 내부로부터 전달된 에너지로서 내부의 연직온도경도에 비례한다. SST실험의 MUSHY에서의 겨울철 연직온도 경도가 상대적으로 더 크다.

Figure 8 Basal growth and melt



◀ **Figure 8** 잠열은 해빙 외부로부터 해빙 바닥으로 전달되는 에너지로서 바닥층 해빙의 생성과 용융에 의해 결정된다. SST 실험에서 두 열역학방안 모두 바닥층 해빙의 용융 시작이 빨라지고 용융되는 양도 증가하였다. 바닥층 순해빙생성량의 차이에 따라 따뜻한 해빙경계조건에서의 잠열은 이른 여름철을 위주로 증가한다.

5. Summary & Conclusion

- 본 연구에서는 다른 해양경계조건에서의 두 열역학 방안 (BL99와 MUSHY)의 해빙모사 민감도를 비교하였다. 다른 해양경계조건에 대하여 BL99보다 MUSHY에서 겨울철 해빙 생성과 여름철 해빙 용융에 대해 더 민감하게 반응하였다.
- 표층 프로세스는 여름철 용융과 밀접한 관련이 있으며 다른 해양경계조건에 크게 영향받지 않는다. 바닥층에서는 해양경계조건에 따라 겨울철 전도열에 의한 생성과 여름철 잠열에 의한 해빙 용융에서 열역학 방안에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났다.
- 이 연구를 통하여 해수온이 상승하는 해양 상태에서 해빙을 모사할 때 열역학 방안의 선택에 따라 반응의 정도가 다를 수 있음을 살펴보았다. 이는 모델 결과를 해석할 때 어떤 열역학 방안을 사용했는지 반드시 고려해야함을 시사한다.