J. Korean Earth Sci. Soc., v. 36, no. 1, p. 82–89, February 2015 http://dx.doi.org/10.5467/JKESS.2015.36.1.82 ISSN 1225-6692 (printed edition) ISSN 2287-4518 (electronic edition)

# 전지구 해양·해빙예측시스템 NEMO-CICE/NEMOVAR의 북극 영역 해빙초기조건 특성 분석

#### 안중배 · 이수봉\*

부산대학교 지구환경시스템학부, 609-735, 부산광역시 금정구 부산대학로 63

## Analyzing the Characteristics of Sea Ice Initial Conditions for a Global Ocean and Sea Ice Prediction System, the NEMO-CICE/NEMOVAR over the Arctic Region

#### Joong-Bae Ahn and Su-Bong Lee\*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstracts: In this study, the characteristics of sea ice initial conditions generated from a global ocean and sea ice prediction system, the Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO) - Los Alamos Sea Ice Model (CICE)/ NEMOVAR were analyzed for the period June 2013 to May 2014 over the Arctic region. For the purpose, the observed and reanalyzed data were used to compare with the sea ice initial conditions. Results indicated that the variability of the monthly sea ice extent and thickness in model initial conditions were well represented as compared to the observation, while it was found that the extent and thickness of Arctic sea ice in initial data were narrower and thinner than those in reanalysis and observation for the period. The reason for the narrower sea ice extent in model initial conditions seems to be due to the fact that the initial sea ice concentration at the boundary area of sea ice was about 20 percent less than the reanalysis data. Also, the reason for the thinner sea-ice thickness in the Arctic Ocean area adjacent to Greenland and Arctic archipelago where thick sea ice appears all the year round.

Keywords: NEMO-CICE/NEMOVAR, global ocean-sea ice modeling, data assimilation, initial condition

**요 약**: 전지구 해양·해빙 예측시스템인 NEMO-CICE/NEMOVAR의 해빙 초기조건의 특성을 2013년 6월부터 2014년 5월까지 북극영역에 대하여 분석하였다. 이를 위하여 관측 자료와 재분석 자료를 모델의 초기조건과 비교하였다. 모델 초기조건은 관측에서 나타나는 해빙 면적과 해빙 두께의 월 변동을 잘 보이는 반면, 분석 기간 동안 관측과 재분석 자료보다 북극의 해빙 면적을 좁게, 해빙 두께를 얇게 나타내었다. 모델 초기조건의 북극 해빙 면적이 좁은 것은 해빙의 경계 지역에서 해빙 농도 초기조건이 약 20% 정도 재분석자료보다 낮기 때문이다. 또한 북극 평균 해빙 두께가 얇게 나타나는 이유는 연중 두꺼운 해빙이 유지되는 그린란드 및 북극 군도와 인접한 북극해 영역에서 모델의 초기조건이 약 60 cm 정도 얇기 때문이다.

주요어: NEMO-CICE/NEMOVAR, 전지구 해양-해빙 모델링, 자료 동화, 모델 초기 조건

### 서 론

\*Corresponding author: sky-shine@pusan.ac.kr Tel: +82-51-514-1932

Fax: +82-51-515-1689

신뢰도가 높은 초기 조건은 수치 모델을 활용한 예보의 정확도에 큰 영향을 미친다(e.g., Kalnay, 2003; Guemas et al., 2014; Balmaseda and Anderson, 2009). 이러한 이유로 수치 모델링 그룹들은 자료동 화를 통하여 가능한 한 정확하고 다양한 정보들을 입력하여 초기 조건을 생산하고, 이를 통하여 수치

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http:// creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

예보의 예측성을 높이고자 노력하고 있다(e.g., Saha et al., 2014; Marshall et al., 2014; Mogensen et al., 2012; Merryfield et al., 2013; Lim et al., 2014; Lee 2012; Ryu et al., 2005). 과거에는 해수온, 염분, 해 수면 고도 등 해양 변수에 대한 자료동화 연구들이 많았다면 최근에는 빙권의 중요성이 대두되고 위성관 측기술의 발전함에 따라 자료를 확보하기에 좀 더 쉬워짐에 따라 해빙 농도와 두께에 대한 자료동화에 대한 연구들이 많아지고 있다(Tietsche et al., 2013, Lindsay 2012).

해빙은 해양의 알베도를 조절하고, 해양의 절연체 역할을 하며 해양-대기 사이의 운동량 및 기체 교환 을 가로막는 역할, 해양의 밀도 변화와 관련하여 해 양 순환까지도 영향을 미치는 중요한 요소이다(e.g., Vancoppenolle et al., 2006; Kim et al., 2006; Pringle et al., 2007). 최근 북극 해빙의 면적과 두께는 급격 하게 감소하고 있으며 2012년 9월에는 3.61×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> 로 역대 최소면적을 기록하였다(http://www.nsidc.org/ arcticseaicenews). 또한 감소하는 해빙의 영향은 북극 해 인근을 넘어서 중위도까지 영향력을 미치고 있음 이 밝혀지고 있다(Kim et al., 2014; Francis et al., 2012; Tang et al., 2013).

이러한 북극 해빙의 영향력은 수치 모델을 활용한 예측에서 간과할 수 없는 부분이다. 좀 더 실제에 가 까운 해빙 초기조건을 생산하는 것은 앞서 언급한 바와 같이 예측의 정확성과 이어져 있다. 이러한 중 요성에도 불구하고 NEMO-CICE/NEMOVAR의 초기 조건에 대한 검증은 아직 수행된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 NEMO-CICE/NEMOVAR에서 생산된 모델 초기 조건 중 해빙 변수인 해빙 농도와 해빙 두께, 해빙 면적을 북극지역에 집중해서 살펴보고자 하였다.

## 자료의 수집

본 연구에서는 전지구 해양·해빙 예측시스템의 해 빙 초기조건 특징을 분석하였다. 예측 시스템은 해양 성분 모형인 Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO; Madec, 2008), 해빙 성분 모형인 Los Alamos Sea Ice Model (CICE; http://oceans11. lanl.gov/trac/CICE), 자료동화 성분인 NEMOVAR로 구성되어있다. NEMOVAR는 전지구 해양 모델 NEMO



Fig. 1. Map of the Arctic.

에 최적화되어 개발된 변분 자료동화 시스템이다. NEMOVAR의 입력 자료로는 NEMO-CICE로부터 생 산된 배경장(background field)과 위성 및 in situ 관 측 자료가 사용된다. 관측 자료로는 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST)와 표층 염분(Sea Surface Salinity, SSS), 해수면 고도 아노말리 그리고 해빙 농 도의 위성 관측 자료와 해수온과 염분의 프로파일 자료가 사용된다. 또한 분석증분갱신법(Incremental Analysis Updates) 기법을 적용하여 자료동화의 증분 이 점진적으로 모델에 적용되도록 한다(Balmaseda et al., 2013). NEMOVAR를 통하여 생산된 분석장 (analysis field)은 NEMO-CICE/NEMOVAR의 해양· 해빙 초기조건이 된다. 본 연구에 사용된 NEMO-CICE/NEMOVAR는 ORCA025 구성으로, 3극 격자 를 채택하고 있으며 경도방향으로 1440개, 위도 방향 으로 1020개의 격자로 이루어져있다. 본 연구에서는 2013년 6월부터 2014년 5월까지의 일별 해빙 초기조 건에 대하여 북극해를 중심으로 분석하였다(Fig. 1).

본 연구에서는 재분석자료들과의 비교를 통하여 NEMO-CICE/NEMOVAR 시스템을 통해 생산된 초 기조건의 월별·계절별 특성을 살펴보았다. 해들리센 터의 SST와 해빙 농도자료(HadISST), ORA-S4의 SSS, Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System (PIOMAS)의 해빙 두께, 미 국립빙설자료센 터(National Snow Ice Data Center, NSIDC)의 해빙 면적 자료를 검증을 위하여 사용하였다.



**Fig. 2.** Monthly sea ice extent of NSIDC (solid line), model (dashed line), and difference between model and NSIDC (grey area) over the Arctic.

### 해빙 초기조건 분석

북극 해빙의 월별 총면적 변화를 분석기간인 2013 년 6월부터 2014년 5월까지에 대하여 나타내었다. Fig. 2에서 실선은 NSIDC에서 제공하는 해빙 지수들 중 관측된 월별 북극 해빙 면적이고, 점선은 NEMO-CICE/NEMOVAR 초기조건의 북극 해빙 면적이다. 모델 초기조건에서 관측을 뺀 차이는 회색면적으로 표시하였다. 모델 초기조건의 해빙 면적은 해빙 농도 가 15% 이상인 지역의 총 면적으로 계산하였으며, 이는 NSIDC에서 해빙 면적 자료를 생산할 때 사용 한 방법과 동일하다. NSIDC 자료에 의하면 3월에 해빙면적이 가장 넓고 9월에 가장 좁으며 모델 해빙 면적 초기조건은 이러한 해빙면적의 계절적 변동을 잘 보여주고 있다. 다만 분석기간 동안 모델 초기조 건은 관측보다 북극 해빙면적을 약 1-2×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> 정도 지속적으로 좁게 나타내었다. 그 중 해빙이 녹는 시 기인 6월에 관측과 모델 초기조건의 차이가 약 3×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> 정도로 가장 크고, 해빙 면적이 최소인 9 월에는 그 차이가 약 1×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> 정도로 가장 작다.

북극 평균 해빙 두께의 월별 변동도 Fig. 3에 나타 내었다. 실선은 PIOMAS의 북극 평균 해빙 두께, 점 선은 모델 초기조건의 북극 평균 해빙 두께이며 회 색 면적은 모델 초기조건에서 재분석을 뺀 차이이다. 재분석 자료에 의하면 분석기간 중 북극 해빙은 9월 에 약 1.2 m 정도로 가장 얇고, 5월에 약 2.2 m 정도



**Fig. 3.** Monthly sea ice thickness of NSIDC (solid line), model (dashed line), and difference between model and NSIDC (grey area) over the Arctic.

로 가장 두껍다. 모델의 초기조건은 PIOMAS 자료의 연변동과 유사한 것처럼 보이지만 해빙 두께의 최소 가 나타나는 시기를 한 달 빠른 8월로 나타내고 있 으며 그 값은 9월까지 유지된다. 분석기간 동안 해빙 초기조건은 재분석보다 약 0.5 m 정도 지속적으로 해 빙을 얇게 나타내었다. 재분석과 차이가 가장 큰 시 기는 5월과 6월로 약 0.6 m, 가장 적은 시기는 해빙이 생성되기 시작하는 9월로 재분석자료보다 약 0.3 m 얇다.

Fig. 4는 모델 초기조건의 해빙 농도 계절 변화를 HadISST의 해빙 농도와 함께 나타내었다. HadISST 자료에 의하면 북극해 중심은 연중 해빙 농도 90% 이상을 유지하고 있으며 육지와 인접해있는 영역과 북극해-북대서양과의 경계, 북극해-북태평양과의 경계 에서 해빙 농도의 계절변동이 일어난다. 모델의 해빙 농도 초기조건은 주로 해빙의 경계지역에서 관측보다 약 20% 낮게 존재한다. 이는 Fig. 2에서 모델 초기 조건의 북극 전체 해빙 면적이 재분석자료보다 좁게 나타나는 것은 주로 해빙의 경계 지역의 해빙 농도 모사능력 때문임을 알 수 있다. 또한 JJA 시기에 모 델은 그린란드와 북극 군도와 인접한 북극해를 제외 한 대부분의 북극해 영역 즉 카라 해, 랍테프 해, 동 시베리아 해, 척치 해, 보퍼트 해에서 해빙 농도를 약 5-20% 낮게 나타내었다.

Fig. 5는 모델 초기조건과 PIOMAS 자료의 북극 해빙 두께의 계절평균과 각 계절별 재분석 자료와



전지구 해양·해빙예측시스템 NEMO-CICE/NEMOVAR의 북극 영역 해빙초기조건 특성 분석 85

Fig. 4. Seasonal Sea ice concentration of HadISST, model and the differences between model and HadISST over the Arctic [unit: %].



Fig. 5. Seasonal Sea ice thickness of PIOMAS, model and the differences between model and PIOMAS over the Arctic [unit: cm].

86 안중배·이수봉

초기조건의 차이이다. 해빙 두께는 해빙 농도와 유사 하게 계절 변화한다. PIOMAS 자료에 의하면 그린란 드와 북극 군도 방향의 북극해 지역에 연중 240 cm 이상의 두꺼운 해빙이 존재하며 SON 시기에 가장 얇고 좁은, MAM 시기에 가장 두껍고 넓은 해빙 분 포를 나타낸다. 모델의 초기조건은 PIOMAS의 자료 와 유사하게 뚜렷한 해빙두께의 계절변화를 나타낸 다. 다만 네 계절에서 일관되게 재분석 자료보다 해 빙두께를 얇게 나타내는 특징을 발견하였다. 특히 연 중 해빙두께가 두꺼운 그린란드와 북극 군도 방향 북극해 영역의 해빙두께를 재분석 자료와 비교하여 50-60 cm 정도 얇게 생산한다. 북극 전체의 평균 해 빙두께를 나타낸 Fig. 3과 비교해보면 이 관측과의 차이는 해빙 경계 지역보다는 해빙이 두꺼운 지역을 과소모사하기 때문이다. 이는 북극 해빙 농도와는 다 른 특성이다. 재분석 해빙 두께와의 차이는 해빙이 녹는 JJA 시기에 가장 크고 넓게 나타나며, 해빙이 최소인 SON 시기에 상대적으로 좁게 나타난다.

Fig. 6은 HadISST와 모델 초기조건의 계절별 SST 분포와 모델과 관측의 차이를 함께 나타내었다. HadISST 자료에 의하면 북대서양 측 노르웨이 해와 바렌츠 해의 SST는 대서양으로부터 유입되는 난류의 영향으로 유사한 위도대인 북태평양 측 척치 해의 SST 보다 상대적으로 높다. 이러한 SST의 분포 특징 은 연중 지속된다. NEMO-CICE/NEMOVAR의 초기 조건은 북극 영역에 대하여 계절 변화에 따른 SST 변동 패턴을 관측과 유사하게 나타내었다. JJA 시기 에는 다른 계절과 비교하여 동 시베리아 해와 랍테 프 해 등의 북극해 영역에서 관측보다 SST를 다소 높게 나타내었다. 이와는 대조적으로 SON 시기에는 북극해 영역에서 관측보다 SST가 약 -0.4-1.0°C 정 도 낮다. 다만 Fig. 4와 Fig. 5와 비교할 때 계절적인 차이 외에 척치 해와 카라 해에서부터 그린란드의 남부와 래브라도 해에 이르기까지 북극 해빙의 가장 자리에 해당하는 영역에서 모델과 관측의 SST 차이 가 분석기간 내에 일정하게 존재한다.

Fig. 7은 북극 영역에 대한 ORA-S4의 SSS와 모 델 초기조건, 두 자료의 차이이다. ORA-S4 자료는 자료의 기간이 제한되어서 2013년 JJA와 SON에 대 하여 나타내었다. ORA-S4 자료에 의하면 북극해 중 심과 북태평양 측의 오호츠크 해와 베링 해를 포함 하는 북극해역들의 SSS는 33.0 psu 이하이다. 반면 Fig. 6에서 SST가 비교적 높게 나타났던 북대서양 측 노르웨이 해와 바렌츠 해의 ORA-S4의 SSS는



Fig. 6. Seasonal SST of HadISST, model and the differences between model and HadISST over the Arctic [unit: °C].

전지구 해양·해빙예측시스템 NEMO-CICE/NEMOVAR의 북극 영역 해빙초기조건 특성 분석 87



Fig. 7. Seasonal SSS of ORA-S4, model and the differences between model and ORA-S4 over the Arctic [unit: psu].

34.0 psu 이상으로 상대적으로 높다. 모델의 초기조건 은 ORA-S4와 유사하게 북극해 중심과 태평양측 해 역들의 SSS는 낮게, 대서양측의 SSS는 높게 나타내 었다. 다만 모델 초기조건은 재분석자료와 비교하여 JJA 시기에 북극해 대부분 영역에 대하여 SSS를 0.6~1.0 psu 이상 낮게 나타내었다. 반면 SON에 척치 해에서의 모델 SSS 초기조건은 재분석 자료보다 1.0 psu 이상 높다. 카라 해, 랍테프 해, 래브라도 해, 허 드슨 만 일부는 JJA와 SON 시기에 공통적으로 ORA-S4와 약 1.0 psu 정도의 SSS 차이가 나타난다.

이 지역은 Fig. 4와 Fig. 5에서 해빙 농도와 두께 가 과소 모사된 지역과 유사하다.

#### 요약 및 결론

본 연구에서는 북극 영역에 대한 NEMO-CICE/ NEMOVAR의 해빙 초기조건에 나타나는 특성을 분 석하였다. 이 초기조건은 NEMO-CICE 해양·해빙 모형으로부터 생산된 배경조건과 해수온과 염분의 프 로파일, 위성 관측된 해수면고도와 해빙 농도 관측을 이용하여 NEMOVAR를 통하여 생산되었다. 전체적

으로 NEMOVAR를 거쳐 생산된 모델의 초기 조건은 관측보다 북극 해빙 면적을 좁게, 북극 평균 해빙 두 께를 얇게 나타내는 특징이 있었다. 해빙 면적과 해 빙 두께는 각각 다른 이유로 재분석과 차이를 보였 다. 해빙 면적은 해빙 농도를 바탕으로 계산되는데, 해빙 농도는 해빙의 경계지역에서 주로 재분석과 차 이가 나타났다. 이와 달리 해빙 두께 초기조건은 해 빙이 연중 두꺼운 그린란드와 북극 군도 인접의 북 극해 영역에 대해서 재분석 자료보다 약 60 cm 정도 얇게 나타났고, 이 차이는 계절에 관계없이 일정하게 나타났다. 초기조건을 생성하는 과정에서 해빙 농도 는 위성관측을 통해 동화가 되었기 때문에 해빙의 경계지역에서 주로 차이가 나지만 해빙 두께는 동화 되지 않았기 때문에 배경조건이 가진 특징을 그대로 보인다. 선행연구에 따르면 자료동화가 없는 NEMO-CICE의 경우 카라 해, 동 시베리아 해, 보퍼트 해, 척치 해 등에서 상대적으로 적게 해빙을 모사하는 특징이 있다(NIMR, 2013). 재분석 자료와 모델 해빙 초기조건의 차이는 해빙이 녹는 시기인 6월을 포함 한 JJA 시기에 가장 두드러지게 나타났다. 또한 이 시기에는 해빙 초기조건 뿐 아니라 해양 초기조건까

지도 카라 해, 동 시베리아 해, 보퍼트 해, 척치 해 등에서 재분석 자료와 차이가 다른 계절과 비교해서 다소 크게 나타났다. 본 연구를 통해 2013년 6월부 터 2014년 5월까지의 해빙 초기조건과 관측 및 재분 석자료의 차이가 연중 일관되는 특징에 대하여 살펴 보았다. 이러한 연중 일정하게 나타나는 차이는 분석 기간이 길어지더라도 크게 다르지 않을 것이라고 생 각된다.

# 감사의 글

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었습니다.

#### References

- NIMR, 2013, Study on development and application of earthquake monitoring techniques. Korea meteorological administration, 669 p. (in Korean)
- Balmaseda, M.A. and D. Anderson, 2009, Impact of initialization strategies and observations on seasonal forecast skill. Geophysical research letters, 36, L0170, doi:10.1029/2008GL035561.
- Balmaseda, M.A., K. Mogensen, and A. Weaver, 2013, Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4. Quarterly journal of the royal meteorological society, 139, 1132-1161.
- Francis, J.A. and S.J. Vavrus, 2012, Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. Geophysical research letters, 39, L06801, doi: 10.1029/ 2012GL051000.
- Guemas, V., F.J. Doblas-Reyes, K. Mogensen, S. Keeley, and Y. Tang, 2014, Ensemble of sea ice initial conditions for interannual climate predictions. Climate dynamics, 43, 2813-2829.
- Kalnay, E., 2003, Atmospheric modelling, data assimilation and predictability. Cambridge University Press, New York, USA, 341 p.
- 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. Nature communications, 5, doi:10.1038/ncomms5646.
- Kim, J.G., E.C. Hunke, and W.H. Lipscomb, 2006, Sensitivity analysis and parameter tuning scheme for global sea-ice modeling. Ocean modelling, 14, 61-80.
- Lee, S.-H., 2012, Analysis of the Impact of QuikSCAT and ASCAT Sea Wind Data Assimilation on the Prediction of Regional Wind Field near Coastal Area. Journal of the Korean earth science society, 33, 309-319. (in Korean)

- Lim, Y.-K., S.-K. Song, and S.-O. Han, 2014, Data assimilation effect of mobile rawinsonde observation using unified model observing system experiment during the summer intensive observation period in 2013. Journal of Korean earth science society, 35, 215-224. (in Korean)
- Lindsay, R., C. Haas, S. Hendricks, P. Hunkeler, N. Kurtz, J. Paden, B. Panzer, J. Sonntag, J. Yungel, and J. Zhang, 2012, Seasonal forecasts of Arctic sea ice initialized with observations of ice thickness. Geophysical research letters, 39, L21502, doi:10.1029/ 2012GL053576.
- Madec, G, 2008, NEMO ocean engine. Note du Pole de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, 217 p.
- Marshall, A.G., D. Hudson, M.C. Wheeler, O. Alves, H.H. Hendon, M.J. Pook, and J.S. Risbey, 2014, Intraseasonal drivers of extreme heat over Australia in observations and POAMA-2. Climate dynamics, 43, 1915-1937.
- Merryfield, W. J., W.-S. Lee, G.J. Boer, V.V. Kharin, J.F. Scinocca, G.M. Flato, R.S. Ajayamohan, J.C. Fyfe, Y. Tang, and S. Polavarapu, 2013, The Canadian Seasonal to Interannual Prediction System. Part I: Models and Initialization. Monthly weather review, 141, 2910-2945.
- Mogensen, K., M.A. Balmaseda, and A. Weaver, 2012, The NEMOVAR ocean data assimilation system as implemented in the ECMWF ocean analysis for System 4, ECMWF Tech Memo 668. European centre for medium-range weather forecasts, 59 p.
- Pringle, D. J., H. Eicken, H.J. Trodahl, and L.G.E. Backstrom, 2007, Thermal conductivity of landfast Antarctic and Arctic sea ice. Journal of geophysical research, 112, C04017, doi:10.1029/2006JC003641.
- Ryu, C.-S, H.-S. Won, and S.-H. Lee, 2005, A study on the influence of aerological observation data assimilation at Honam area on numerical weather prediction. Journal of the Korean earth science society, 26, 66-77. (in Korean)
- Saha, S., S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, D. Behringer, Y.-T. Hou, H.-Y. Chuang, M. Iredell, M. Ek, J. Meng, R. Yang, M. P. Mendez, H.v.d. Dool, Q. Zhang, W. Wang, M. Chen, and E. Becker, 2014, The NCEP Climate forecast system version 2. Journal of climate, 27, 2185-2208.
- Tang, Q., X. Zhang, X. Yang, and J.A. Francis, 2013, Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss. Environmental research letters, 8, 014036, doi:10.1088/1748-9326/8/1/014036.
- Tietsche, S., D. Notz, J.H. Jungclaus, and J. Marotzke, 2013, Assimilation of sea-ice concentration in a global climate model-physical and statistical aspects. Ocean science, 9, 19-36.

Vancoppenolle, M., T. Fichefet, and C.M. Bits, 2006, Modeling the salinity profile of undeformed Arctic sea ice. Geophysical research letters, 33, L21501, doi: 10.1029/2006GL028342.

Vancoppenolle, M., T. Fichefet, H. Goosse, S. Bouillon, G.

Madec, and M.A.M. Maqueda, 2009, Simulating the mass balance and salinity of Arctic and Antarctic sea ice. 1. Model description and validation. Ocean Modelling, 27, 33-53.

Manuscript received: January 20, 2015 Revised manuscript received: February 1, 2015 Manuscript accepted: February 16, 2015