

기상청 전지구 해양자료동화시스템 2(GODAPS2): 운영체계 및 개선사항

박형식* · 이조한 · 이상민 · 황승언 · 부경은

국립기상과학원 기후연구부

(접수일: 2023년 3월 31일, 수정일: 2023년 5월 19일, 게재확정일: 2023년 6월 13일)

Global Ocean Data Assimilation and Prediction System 2 in KMA: Operational System and Improvements

Hyeong-Sik Park*, Johan Lee, Sang-Min Lee, Seung-On Hwang, and Kyung-On Boo

Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 31 March 2023; revised 19 May 2023; accepted 13 June 2023)

Abstract The updated version of Global Ocean Data Assimilation and Prediction System (GODAPS) in the NIMS/KMA (National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration), which has been in operation since December 2021, is being introduced. This technical note on GODAPS2 describes main progress and updates to the previous version of GODAPS, a software tool for the operating system, and its improvements. GODAPS2 is based on Forecasting Ocean Assimilation Model (FOAM) vn14.1, instead of previous version, FOAM vn13. The southern limit of the model domain has been extended from 77°S to 85°S, allowing the modelling of the circulation under ice shelves in Antarctica. The adoption of non-linear free surface and variable volume layers, the update of vertical mixing parameterization, and the adjustment of isopycnal diffusion coefficient for the ocean model decrease the model biases. For the sea-ice model, four vertical ice layers and an additional snow layer on top of the ice layers are being used instead of previous single ice and snow layers. The changes for data assimilation include the updated treatment for background error covariance, a newly added bias scheme combined with observation bias, the application of a new bias correction for sea level anomaly, an extension of the assimilation window from 1 day to 2 days, and separate assimilations for ocean and sea-ice. For comparison, we present the difference between GODAPS and GODAPS2. The verification results show that GODAPS2 yields an overall improved simulation compared to GODAPS.

Key words: Ocean Data Assimilation, GODAPS2, NEMO, NEMOVAR, GloSea6

1. 서 론

국립기상과학원은 기상청 1~3개월 계절예측 및 장기전망 대국민 서비스 지원을 위해 2014년부터 영국 기상청 기후예측시스템(Global Seasonal Forecasting

System, GloSea)을 도입하여 운영하여 왔으며, 2021년 10월에는 Global Couple (GC) 3.2 버전의 개선된 기후예측시스템(GloSea6)을 기상청 슈퍼컴퓨터 5호기에 구축하여 현업으로 운영하고 있다(Kim et al., 2021). GloSea6는 대기, 해양, 해빙, 지면 모델로 구성되어 있으며 각각 Unified Model (UM v.11.5; Walters et al., 2019), Nucleus for European Modeling of the Ocean (NEMO v.3.6; Storkey et al., 2018), Los Alamos Sea-ice Model (CICE v.5.1.2; Hunke et al., 2015), Joint UK Land Environment Simulator (JULES v.5.6; Walters et

*Corresponding Author: Hyeong-Sik Park, Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6640, Fax: +82-64-738-6514
E-mail: phs0310@korea.kr

al., 2019)를 채택하고 있다.

대기-해양 결합모델을 이용하여 기후예측 수행 시 예측성능은 결합된 모델의 초기화 방식에 의존하기 때문에 초기화 과정은 중요하다(e.g., Balmaseda and Anderson, 2009). GloSea6의 자료동화는 대기, 해양모델의 자료동화 과정을 통해 각각 계산된 초기장을 이용하는 비결합 자료동화(non-coupled data assimilation) 방식을 채택하고 있다. 대기 초기장은 기상청 전지구 수치 예보모델이 생산한 예측 결과에 자료동화를 수행하여 생산된 전지구 자료동화예측시스템(Global Data Assimilation and Prediction System, GDAPS) 분석장을 대기모델 격자에 공간 변환하여 적용하고 있고, 해양-해빙 초기장은 전지구 해양자료동화시스템(Global Ocean Data Assimilation and Prediction System version 2, GODAPS2)으로 산출한 분석장을 적용한다.

전지구 해양자료동화시스템(GODAPS)은 대국민, 공군 및 유관기관 등 해양기상예측정보 제공을 위해 영국 기상청의 현업 시스템인 해양자료동화 예측모델(Forecasting Ocean Assimilation Models, FOAM; Blockley et al., 2014)을 기반으로 구축하여 2018년부터 운영 중에 있다(Chang et al., 2021). 개선된 기후예측시스템(GloSea6)의 해양-해빙 초기장을 자체 생산, 제공하기 위하여 GODAPS를 업그레이드(GODAPS version2, GODAPS2)하고 현업 운영체계를 구축 및 현업화하여 2021년 10월부터 운영하고 있다. GODAPS는 2022년 2월까지 운영 후 종료되었다.

본 기술노트에서는 기상청 현업 전지구 해양자료동화시스템 GODAPS2의 운영 체계와 변경된 사항들을 소개하고, 모델 수행 결과를 GODAPS와 비교하고자 한다. 제2장에서는 과학적 측면에서 개선된 사항들을 GODAPS2 모델 구성 요소별로 설명하였고, 제3장에는 현업 해양자료동화시스템의 변경된 운영체계와 계산 환경에 대해 기술하였다. 제4장에서는 자료동화에 사용되는 관측자료를 설명하였고, 제5장에서는 GODAPS2

구축 후 기존의 GODAPS 결과와 비교하여 안정적인 생산과 초기장 사용이 가능한지 확인하였다. 제6장에서는 몇 가지 요소에 대해서 관측과 재분석장을 이용해 GODAPS2 분석 결과를 검증하였다. 마지막으로 본 기술노트의 내용을 요약하여 제7장에 담았다.

2. GODAPS2 모델 구성 및 개선 사항

기존 FOAM vn13 기반의 GODAPS를 FOAM vn14.1 기반의 GODAPS2로 업그레이드하고 현업 운영체계를 구축하였다. 모델링과 자료동화를 위해 해양모델은 NEMO vn3.6, 해빙모델은 CICE vn5.1, 해양 자료동화모델은 NEMOVAR (A variational data assimilation system for the NEMO ocean model) vn5를 사용하며 기존 대비 상향된 버전의 모델을 사용하였다. GODAPS의 더 자세한 구성과 요소는 Chang et al. (2021)을 참고하기 바란다. GODAPS 대비 GODAPS2의 주요 업그레이드 사항을 정리하였고(Table 1), 이에 대해 간단히 설명하고자 한다. 이하 내용들은 영국기상청의 개발 이력(wiki) 페이지(code.metoffice.gov.uk)의 내용을 토대로, 해양모델은 Storkey et al. (2018), 해빙모델은 Ridley et al. (2018), 해양자료동화모델은 Waters et al. (2017), While and Martin (2019) 등을 참조하여 작성하였다.

GODAPS2의 전체적인 운영 흐름을 간략히 나타내면 다음과 같다(Fig. 1). 먼저, 1) 기상청 전지구 수치예보시스템(GDAPS)으로부터 플럭스 자료를 추출하여 모델 격자로 내삽하는 해수면 경계자료 생산과정을 수행한다. 2) 입수된 관측자료를 품질관리 프로그램(NEMO Quality Control, NEMOQC)에서 사용 가능하도록 전처리를 한다. 이후, 3) 관측자료의 품질관리를 수행하고 해양모델링, 자료동화 과정에서 읽어 들일 수 있는 형태로 전환 한다. 4) 해양-해빙 모델을 구동하면서 관측자료의 위치와 시간에 해당하는 모델

Table 1. Updated science configurations of GODAPS2.

| | GODAPS | GODAPS2. |
|---------------------|---|---|
| Model | FOAM vn13 based NEMO vn3.4 – CICE vn4.1 1-ice layer | FOAM vn14.1 based NEMO vn3.6 – CICE vn5.1 4-ice layer |
| Resolution | ORCA025/L75 | eORCA025/L75 |
| Domain | 90°N~77°S | 90°N~85°S |
| Data Assimilation | 3DVAR (NEMOVAR vn3) 1-day IAU | 3DVAR (NEMOVAR vn5) 2-day IAU |
| Bias correction | SST | SST, SLA |
| Atmospheric forcing | KMA NWP GDAPS N1280 3hourly (N1280L70) | |
| Vertical mixing | Turbulent kinetic energy (TKE) scheme | |
| Flux exchange | Bulk formula | |

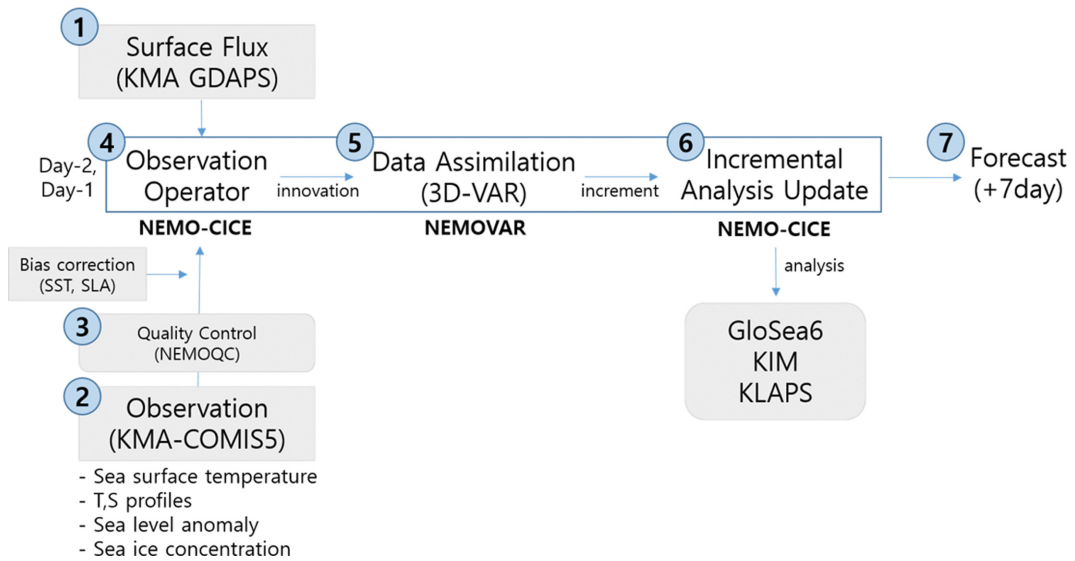


Fig. 1. Schematic diagram of GODAPS2.

값을 배경 값으로 이용하여 관측증분(innovation)을 계산한다. 5) 관측증분을 바탕으로 변분법(3D-Var) 기반의 자료동화를 수행하고 모델 격자별 분석 증분(increment)을 계산한다. 6) 해양-해빙 모델을 다시 수행하며 IAU (Incremental Analysis Update) 방법을 이용하여 분석 증분을 동화하여 분석장을 생산한다. 이때, GODAPS2에서는 자료동화를 1일(D-1 day~analysis day)만 수행했던 GODAPS와 다르게 2일(D-2 day~analysis day)간의 자료동화를 수행한다. 그렇기 때문에 4)~6) 과정을 먼저 D-2일에 대해서 수행하고 분석장을 생성한다. 이렇게 생성된 분석장을 D-1일의 배경장으로 사용하여 4)~6) 과정을 다시 수행하여 최종적인 분석장을 생성한다. 이 분석장은 GloSea6의 해양-해빙 초기장으로 제공되고, 한국형 수치예보모델 (Korean Integrated Model, KIM)과 초단기 예측모델 (Korea Local Analysis and Prediction System, KLAPS)의 해양 혼합층 산출에 사용되고 있다. 추가적으로, 7) 해양-해빙 분석장의 정합성 확인 및 향후 서비스 활용을 대비하여 GDAPS 플렉스를 경계값으로 해양-해빙 모델을 단독으로 수행하여 7일 예측장을 생산한다.

GODAPS2는 해양-해빙 초기장의 자료동화 품질 향상을 위해 이른 분석(ERLY)과 늦은 분석(LATE)으로 하루에 2회 수행된다. ERLY는 매일 17:30KST에 수행되는 GloSea6의 초기장 제공을 위하여 매일 15:00KST에 수행되고 그 전일 LATE의 결과를 배경장으로 사용한다. LATE는 다음날 09:30KST에 수행되며 ERLY의 자료동화 시점인 15시 이후 수집된 관측자료와 입전에 문제가 생긴 관측자료를 처리하여 추가 적용함

으로써 ERLY의 분석장 품질을 향상시키고, 궁극적으로 전체 자료동화 및 해양-해빙 초기장의 품질을 향상시킨다.

해양 및 해빙 모델의 개선사항에 대해서는 Kim et al. (2021)에서 GloSea6 시스템이 소개되면서 간략히 설명되었으나, 이 장에서는 좀 더 상세히 기술하는 한편, 해양자료동화시스템인 NEMOVAR의 개선사항에 대해서는 새롭게 소개하도록 한다.

2.1 해양 모델(NEMO)

해양모델은 ORCA025이었던 격자 체계가 남위 77°에서 85°으로 더 확장된 영역을 포함하는 eORCA025 격자 체계로 변경되었다. 해상도는 이전과 동일하게 적도에서 약 29 km, 고위도로 갈수록 해상도가 증가하여 60°에서 약 13 km의 해상도를 가진다. 연직방향으로는 75개의 연직층으로 구성되고, 해저면에서는 수심 두께를 고려한 partial step으로 표현된다(Barnier et al., 2006). eORCA025 격자 체계로 변경되면서 남극 주변 빙봉의 패인 동공(iceshelf cavities)을 모의할 수 있게 되었고 남극 대륙붕 주변의 수심 측량값도 갱신되었다. 또한, 빙봉의 패인 동공은 닫혀있다고 가정하고 주요한 빙봉 아래에서의 해양순환을 모의할 수 있게 되었는데, 빙봉 가장자리 표면으로부터 얼음이 녹아 생성되는 담수의 수심별 플렉스를 미리 정하고 빙봉 아래 뒤집히는 순환(overturning circulation)을 모의하도록 하였다(Mathiot et al., 2017). 모델 수심은 GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans; IOC, IHO and BODC, 2003)를 기반으로 연안해역을

보정한 ETOPO1 (Amante and Eakins, 2009)을 이용한다.

GODAPS에서는 선형 자유수면파(linear free surface)를 적용했으나, GODAPS2에서는 시공간적으로 다양한 연직층을 갖는 비선형 자유수면파(non-linear free surface)와 가변 체적층(Variable Volume Layers, VVL)이 적용되었다. 이로 인해 수심 층이 해양고도에 따라 움직이게 되고, 연직 기둥(water column)의 각 셀의 두께(cell thickness)가 시간에 따라 변함으로써 해수면 담수 플럭스를 더 정확하게 모의할 수 있게 되었다(Storkey et al., 2018).

운동량 이류의 비회전 부분은 Hollingsworth et al. (1983)의 불안정성이 발생하는 것을 방지하는 수정된 공식이 적용되었다. 또한, Ducouso et al. (2017)의 개선된 적도잠류(equatorial undercurrent)와 증가된 에디 운동 에너지를 반영하는 새로운 공식을 적용함으로써 동태평양의 적도 해류 시스템을 보다 사실적으로 모의하고 있다.

운동량 이류 연직혼합 모수화로는 turbulent kinetic energy (TKE) (Gaspar et al., 1990) 기법을 사용해 파동 절단(wave breaking)을 통해 표면 근처의 혼합을 개선한 버전을 사용한다(Madec, 2016). 표층부 연직 혼합은 준-관성파의 파동 절단(near-inertial wave breaking) (Rodgers et al., 2014)의 모수화에 의존하는데, 이 모수화와 관련된 e-folding 길이규모 변수(nn_htau)는 위도에 따라 달라질 수 있다. 기존의 nn_htau는 중위도 및 고위도에서 감소하며 과도하게 깊은 여름철 혼합층 편차와 차가운 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST) 편차를 줄였지만, 남극해의 여름철 혼합층은 기후값에 비해 너무 얇았다. 그래서 nn_htau는 남반구에서 더 깊어지도록 추가적으로 조정되었다. 그 결과, 남반구의 여름철 혼합층 깊이는 깊어졌으며 SST의 온난 편차를 감소시켰고, 이로 인해 해빙이 증가되어 해빙 모의 성능이 향상되었다.

오랜 기간 동안 남극해에서 SST의 온난 편차가 있어 왔는데, 이는 주로 대기에서 생기는 편차로 인한 결과로 추정되었다(Williams et al., 2017). 이러한 편차를 줄이기 위해 바다에서의 등밀도 확산(isopycnal diffusion) 매개변수를 조정하였다. 에디에 의한 등밀도 확산은 깊은 곳의 열을 해수면으로 이동시킨다(Griffies et al., 2015). 등밀도 확산 매개변수를 기존 값인 $300 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 에서 $150 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 으로 줄여서 SST를 낮추어 온난 편차를 줄이는 것과 동시에 북대서양과 북태평양에서는 한랭 편차를 감소시켰다(Williams et al., 2017).

동토에서 바다로 들어가는 담수와 관련된 과정은 라그랑지안 빙산(Lagrangian iceberg) 모델과 빙봉 용해 모수화를 사용하여 보다 사실적으로 모델링된다.

남극이나 그린란드 지역에서 떨어져 나간 빙봉은 해류에 의해 이동하다가 녹게 되는데, 이 과정에서 잠열을 흡수하여 해양에 담수를 공급하게 된다. 이 과정이 기존에는 runoff에 포함되어 있었으나, 새 버전에서는 라그랑지안 빙산 모델을 통해 구현되었다(Bigg et al., 1997; Marsh et al., 2015).

2.2 해빙모델(CICE)

해빙모델은 동역학, 열역학, 리징(ridging) 등 동역학적 재분산(mechanical redistribution)에 의한 ice thickness distribution (ITD)의 시공간적 변화를 결정한다(Thorndike et al., 1975; Hunke et al., 2015). 각 격자점에서 부빙군(ice pack)을 5개의 카테고리 나누고 개방수역(open water)에 대해 얼음이 없는 카테고리를 추가하여 ITD를 모델링한다. 빙역학(ice dynamics)은 Elastic-Viscous-Plastic (EVP) 방법을 사용한다(Hunke et al., 2015). 알베도는 CCSM3 (Community Climate System Model 3)에 사용된 방식을 기반으로 하며, 가시대역(< 700 nm) 및 근적외대역(> 700 nm)으로 나눈 다중 대역 알베도를 사용한다. 지형을 고려한 용해 연못(melt pond) 방안(Flocco et al., 2010, 2012; Hunke et al., 2015)을 채택하여 용해 연못의 비율과 깊이를 미리 판단하고, 용해 연못이 알베도에 미치는 영향을 명시적으로 표현하였다. 그 결과, 용해 연못의 물로 인해 해빙을 더 빠르게 녹게 하고 여름철 북극의 해빙을 더 감소시켰다.

GODAPS에서는 해빙을 단일층으로 취급하는 zero-layer thermodynamic model (Semtner et al., 1976)을 열역학으로 사용하여 표층온도가 표면 강제력에 즉각적으로 반응하고, 해빙 내부의 열전도가 균일하였던데 반해, 하지만 GODAPS2에서는 4개의 해빙 층과 1개의 눈 층으로 나누어서 처리하게 되는 다층 열역학 방식(Bitz and Lipscomb, 1999)을 적용하였고, 해빙은 온도와 염분에 따라 달라지는 열용량을 가지고 수직 방향에 따라 열전도가 달라지도록 처방되었다. 다층 열역학 방식은 북극에서 여름철 해빙의 양을 증가시켜 용해 연못의 물로 인해 여름철 해빙의 양이 줄어드는 경향을 상쇄시킨다. 또한, 북극과 남극에서 겨울철 얼음의 두께와 범위를 감소시킨다. 단일층 열역학 방식과 달리 0이 아닌 열관성을 가지기 때문에, 봄철에 얼음이 녹는 데 걸리는 시간을 증가시키고 가을철에 얼음이 형성되는 시간을 증가시킨다.

또한 해양-해빙 항력 계수를 0.00536에서 0.01으로, 눈이 쌓이지 않은 해빙(bare ice)의 가시대역 알베도를 0.78에서 0.833으로 증가시켰으며, 눈에 대한 열전도율을 조절하여 GloSea6에 결합되어 있는 지면모델 JULES의 값과 일치시켰다(Ridley et al., 2018). 그리고 해수의 어는점이 -1.8°C 의 고정된 값으로 설정되

어 있었으나, 새 버전에서는 어느점을 염분의 함수로 구하도록 개선되었다.

2.3 자료동화모델(NEMOVAR)

NEMOVAR는 NEMO 해양모델에 최적화된 자료동화시스템으로서 다변량(multivariate) 기법(Weaver et al., 2005)을 적용하고 증분(incremental) 3D-VAR의 형태를 갖고 절대적 확산 연산자(implicit diffusion operator)를 적용한 배경오차 상관 모델(Mirouze and Weaver, 2010)을 이용한다. 자료동화의 정확성 증가를 위해 적시배경값(First Guess at Appropriate Time, FGAT)으로 구축되어 있으며, 해양모델 NEMO가 예측(-48~24 h 및 -24~0 h)을 수행하면서 적분시간 Δt (20분)마다 배경장을 생산하고, 그 시각과 가까운 관측시각에 대한 관측자료와의 차이인 관측증분을 구한다. 이때, 자료동화창(data assimilation window)은 48시간이 된다(Fig. 2). GODAPS2의 자료동화는 GODAPS와 달리 해빙과 해양을 분리해서 수행한다. 해빙 자료동화가 먼저 수행되고, 여기서 생산된 분석장을 다시 배경장으로 사용하여 해양 자료동화가 수행된다. GODAPS2에서는 비선형 자유표면파를 처리하기 위해 수온, 염분 프로파일에 대한 관측연산자를 변경하였다. 또한, 분석증분 갱신기법(IAU)을 이용하는 과정에서 해수면 고도(Sea Surface Height, SSH)의 변화로 인해 담수의 가짜 플러스가 발생하지 않도록 변경하였고, 수평 배경오차 공분산 상관 모델의 절대적인 확산을 3D에서 2D로 변경하여 해안선과 섬 근처에서 모의를 개선하였다(Martin et al., 2017). 자료동화하는 데 사용되는 수평 길이규모(length scale)는 적도에서 150 km, 고위도에서 25 km로 다양하며 Rossby 반지름을 기반으로 정한다(Waters et al., 2017).

길이규모를 고위도에서 15 km까지 줄이며 현실적인 해양 변동성을 표현하였다(Fiedler et al., 2019). 변분 편차보정 방법(variational bias correction method)과 관측 편차(표준 관측과 고품질 관측 간의 차이로 간주)에 기반한 보정 방법을 결합한 새로운 편차보정 방법을 적용하였다. 이 편차보정 방법은 장기간 재분석에 걸쳐 일관된 결과를 제공하도록 설계되었고, 관측 편차를 사용하여 기존의 변분 편차보정의 단일한 방법보다 정확하고 안정적인 분석을 제공한다(While and Martin, 2019).

새로운 해수면 고도 아노말리(Sea Level Anomaly, SLA) 보정 항이 추가되어 고위도에서의 증분이 감소하고 격자규모 해양 프로세스(resolved ocean processes)와 SLA 신호(signal)와의 불일치가 감소하였다. SLA 예측은 전지구 해양에서 개선되었고, 특히 남극해에서 RMSE가 약 10% 감소하며 크게 개선되었다.

갱신된 평균역학고도장(Mean Dynamic Topography, MDT)은 CNES-CLS-13 MDT를 사용하면서 전반적으로 SSH 및 T 프로파일의 배경장과 관측의 차이인 관측 증분이 크게 줄어들었다. 자료동화는 적도에서 가상의 연직 속도(w)를 산출하게 되는데, 증분 압력보정(Incremental Pressure Correction, IPC)을 통해 자료동화가 w에 미치는 영향을 줄이는 기법(Waters et al., 2017)을 적용하였다. 또한 편차 압력보정(Bias Pressure Correction, BPC)와 함께 적용되며 대부분의 열대지방에서 월간 연직 속도의 변동성이 상당히 감소하게 되었고 초기화 충격(initialization shock)도 줄어들었다.

3. GODAPS2 현업 운영체계 및 계산환경

먼저 운영체계에서 가장 큰 변화가 있었는데,

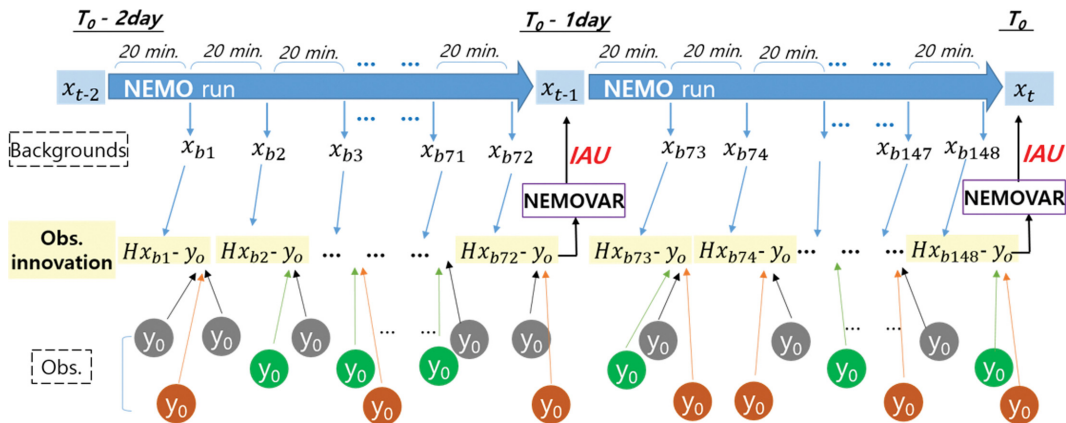


Fig. 2. Diagram of the two cycling schemes of 3DVar-FGAT. Each cycle has 24 hr assimilation window. Time goes from -2 day in the left to 0 day in the right.

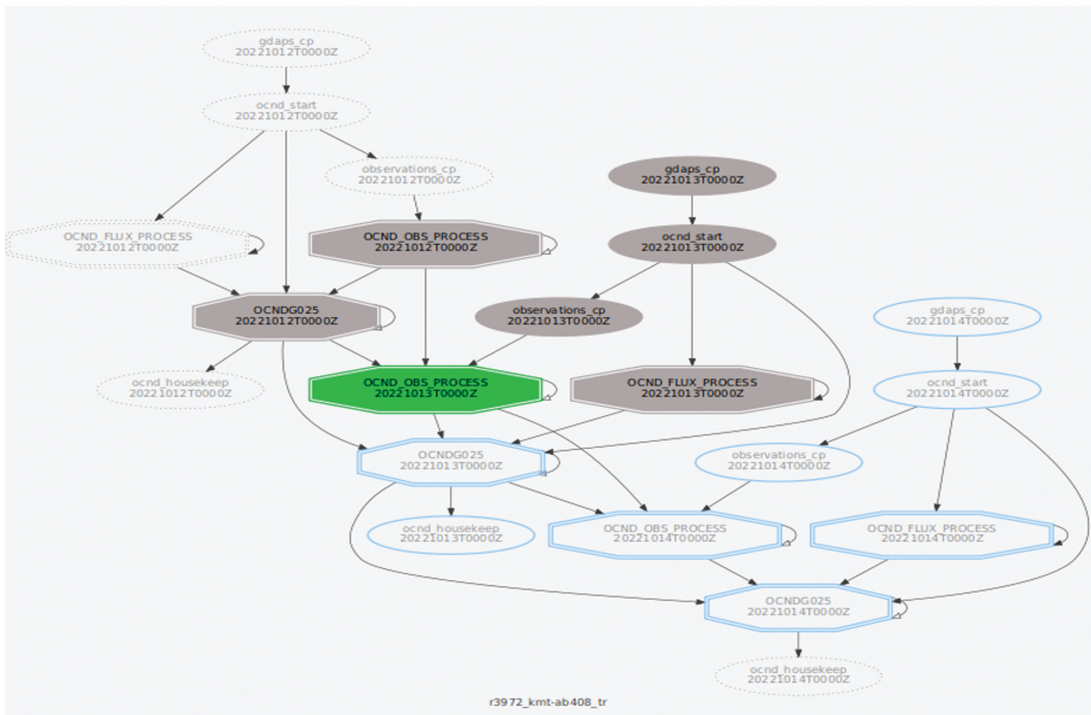
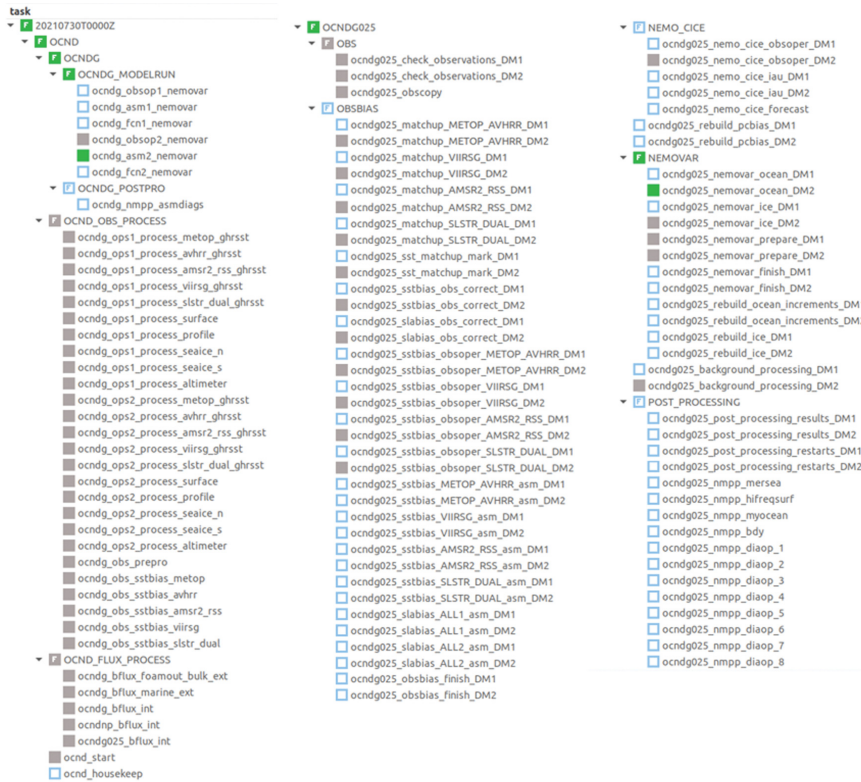


Fig. 3. The graphic view of the flow of GODAPS2 in Rose/Cyclc operational framework.

Table 2. Descriptions of tasks for the GODAPS2 Rose/Cylc suite in order of execution.

| Task | Sub-task | Descriptions |
|-----------------------------|--|---|
| install_cold | install_cold | Install utilities and configuration of ancillaries |
| MAKE_V14 | fcm_make_ocean, fcm_make_nemovar, fcm_make_matchup, fcm_make_obs_oper_by_inter, fcm_make_nemoqc, fcm_make_obstools | Install executable files |
| ocnd_start | | prepare to run suite |
| gdaps_cp observations_cp | | copy GDAPS and observations |
| OCND_FLUX_ PROCESS | ocndg_bflux_foamout_bulk_ext, ocndg_bflux_marine_ext | extraction of boundary data from GDAPS |
| | ocndnp_bflux_int, ocndg025_bflux_int | interpolation of extracted GDAPS into eORCA025 grid |
| OCND_OBS_ PROCESS | ocndg_ops_process_*, ocndg_obs_prepro | quality control (NEMOQC) |
| OBS OBSBIAS | ocndg025_obscopy, ocndg025_check_observations, ocndg025_matchup_*, ocndg025_sst_matchup_mark, ocndg025_sstbias_obsoper, ocndg025_sstbias_obs_correct, ocndg025_slabias_obs_correct, ocndg025_sstbias_*, ocndg025_slabias_*, ocndg025_obsbias_finish | satellite observation (SST, SLA) bias correction |
| NEMO_CICE | ocndg025_nemo_cice_obsoper_DM, ocndg025_nemo_cice_iau_DM, ocndg025_nemo_cice_forecast | run the NEMO, CICE model (observation operator, Incremental Analysis Update, forecast) |
| NEMOVAR | ocndg025_nemovar_prepare, ocndg025_background_processing, ocndg025_nemovar_ice, ocndg025_nemovar_ocean, ocndg025_rebuild_ocean_increments ocndg025_rebuild_ice_increments ocndg025_nemovar_finish ocndg025_rebuild_pcbias | data Assimilation (ocean, ice) |
| POST_ PROCESSING | ocndg025_post_processing_result ocndg025_post_processing_restarts ocndg025_nmpp_mersea ocndg025_nmpp_hifreqsurf ocndg025_nmpp_myocan ocndg025_nmpp_bdy ocndg025_nmpp_diaop | post-processing of model results |

*: observation types (surface, profile, seaice, altimeter, METOP, AMSR, VIIRS)

GODAPS은 기상청 슈퍼컴퓨터 4호기에서 Shell 기반의 체계로 운영된 것과 달리 GODAPS2에서는 슈퍼컴퓨터 5호기에서 그래픽 인터페이스(GUI) 기반의 Rose/Cylc 운영체계가 전면적으로 도입되었다. GODAPS2의 운영체계는 GloSea6의 Rose/Cylc 운영체계와 유사하므로, Rose/Cylc에 대한 간략한 설명은 Kim et al. (2021)을 참조할 수 있다. Figure 3은 GODAPS2의 실시간 운영 중인 Cylc 창으로 진행 사항, task의 작업 상태 등을 보여준다. 이처럼 Rose/Cylc의 도입으로 현업운영 현황을 파악하는데 있어 편의성이 증대되고 장애 상황 시에 신속하게 대처할 수 있어 운영 안정성이 크게 향상되었다. GODAPS2의 suite 구성을 작업 순서에 따라 Table 2에 간략하게 제시하였다. 운영 흐름에 따라 suite이 구성되어있는데, install_cold와

MAKE_V14 작업은 필요 실행파일, 유틸리티, 보조파일 등을 설치하는 작업으로서 처음 수행 시에만 실행된다. 또한, 현재 관측자료 전처리 부분만 GODAPS2 suite에 포함되어 있지 않고 Shell 기반으로 따로 수행 중이며 향후 suite에 포함할 계획이다.

GODAPS2는 2021년 6월에 슈퍼컴퓨터 5호기에서 구축을 완료하여 준현업 운영을 시작하였고, 2021년 10월부터 현업 운영을 시작하였다. 기존 GODAPS는 구축이 되어있던 슈퍼컴퓨터 4호기의 운영 종료로 인해 2018년 10월에 현업 운영을 시작으로 2022년 2월에 종료되었다. 병행운영 기간은 2021년 6월~2022년 2월이고 GODAPS의 분석장은 저장 공간 부족으로 인하여 2021년 1~12월 자료만 보관하고 있다 (Table 3).

Table 3. Comparison of operation information between GODAPS and GODAPS2.

| | GODAPS | GODAPS2 |
|--|------------------------------|--|
| Operation period | October 2018 ~ February 2022 | October 2021 ~ current (June ~ September 2021 for semi operation) |
| Storage period (at 5 th supercomputer) | January ~ December 2021 | June 2021 ~ current |
| Generation of supercomputer | 4 th | 5 th |
| Parallel operation period | June 2021 ~ February 2022 | |

Table 4. List of observations assimilated by the GODAPS2 as of Feb. 2023.

| | Variable | Platform | Provider |
|-----------|---------------------------------------|---|-----------------------|
| Profile | Temperature, Salinity (in-situ) | Argo, Moored buoys (TAO etc), Ships (XBT, CTD etc) | GTS |
| Surface | SST (in-situ) | Surface drifters, Moored buoys (TAO etc) | GTS |
| | SST (satellite) | ¹ AVHRR (² METOP) ³ AMSR2 (GCOM-W1), ⁴ VIIRS (Suomi NPP) | IFREMER JPL PODDAC |
| Altimeter | SLA (satellite) | Altika, Sentinel-3A, Sentinel-3B Sentinel-6A Cryosat-2 Jason-3 Haiyang-2B | COPERNICUS |
| SeaIce | Concentration (satellite) | ⁵ SSMIS (DMSP) | OSI-SAF |

¹AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer

²METOP: Meteorological Operational satellite

³AMSR2: Advanced Microwave Scanning Radiometer 2

⁴VIIRS: Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

⁵SSMIS: Special Sensor Microwave – Imager/Sounder

계산환경은 슈퍼컴퓨터 4호기에서 성능이 향상된 5호기로 변경되었다. 전산환경의 변화에 대한 상세한 내용도 Kim et al. (2021)을 참고할 수 있다. 이런 성능이 8.8배 향상된 슈퍼컴퓨터 5호기에서의 GODAPS2 모델수행 소요시간은 1일 자료동화 기준으로 경계자료 전처리 16분, 품질관리 8분, 관측연산자 과정 5분, 자료동화 15분, 분석중분 갱신 5분 등 총 약 50분이 소요된다. 총 2일의 자료동화를 하여 총 약 75분이 소요되며 이는 GODAPS와 비교하여 계산 시간이 약 20~30% 단축된 것이다.

4. 입전 관측자료 개선사항

GODAPS2는 분석일의 SST, SSH, 해빙 농도, 수온 및 염분 프로파일 관측자료를 수집 및 처리하고 자료

동화하고 있다. 매일 가용한 자료를 수집하고 있으며 관측 주기가 긴 관측자료(Argo, Ships 등)는 자료가 있을 때 적용되고 관측 주기가 짧고 관측 개수가 많은 자료(수온 및 염분 프로파일, 계류부이, 위성 관측 자료)는 전처리 과정에서 속아내기(thinning) 방법을 적용하여 모델 해상도를 고려한다. 예를 들어, 계류부이(Tropical Atmosphere Ocean, TAO)의 경우 시간적으로 24시간 평균한 값을 자료동화한다. 또한, 품질관리 과정에서 일정 반경 안의 영역을 통합하고 영역 내의 관측 점들을 정렬하여 특정 값을 사용하고 평균을 계산하여 해상도를 조정하는 공간 대표 관측 산출 기법(super-obbing)을 통해 과도하게 자료가 동화되는 것을 방지하고 있다. 2023년 1월 기준으로, 자료동화에 사용하고 있는 관측자료의 종류는 Table 4와 같으며 각 관측자료의 공간분포는 Fig. 4에서 확인할 수

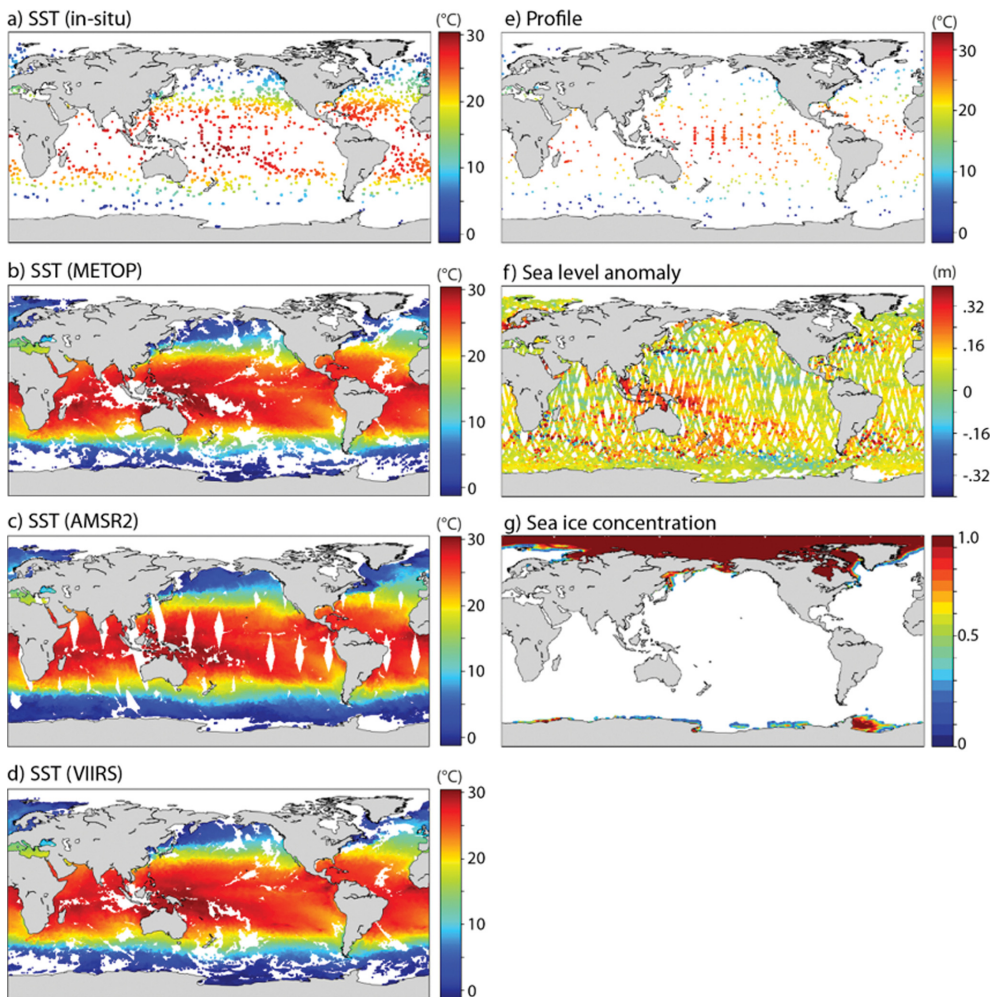


Fig. 4. Spatial distribution of the ocean observations assimilated in the GODAPS2 (*23.2.1).

있다. GODAPS 운영기간 관측자료와 비교하면 2018년 5월 SST 위성관측 자료인 AVHRR NOAA18-G가 서비스가 중단되며 대체 수집한 AVHRR NOAA19-G는 2021년 1월부터 서비스가 중단되었다. 또한 VIIRS 자료와 AMSR2 자료는 2018년 4월부터 사용 중이며, 2022년 6월부터 VIIRS v2.61 자료가 서비스 중단되어 VIIRS v2.80 자료로 대체되었고, AMSR2 v8a 자료는 2022년 12월 서비스 중단되어 v8.2 자료로 대체되었다. SLA 자료에 대해서는 Jason-3 자료가 2017년 3월부터 2022년 4월까지 사용되었고, Altika, Sentinel-3A, Sentinel-3B 자료가 각각 2014년 3월, 2017년 3월, 2019년 10월부터 현재까지 사용 중이다. 또한 2023년 2월부터 Cryosat-2n, Haiyang-2B, Sentinel-6A, Jason-3n 자료를 추가하였다. 관측자료는 T-48h~T-24h, T-24h~T-0h에 해당하는 자료동화창 내에 포함되는 자료들을 전처리한 후 품질관리를 수행하고 있다. 이후 위성 관측자료는 센서의 차이 등의 이유로 오차가 생기기 때문에 편차보정을 하고 있으며, 기존 SST 자료 편차보정뿐만 아니라 SSH 변이 자료 편차보정이 추가되었다.

앞서 언급한 대로 GODAPS2는 ERLY, LATE 버전으로 하루에 2회 수행되고 있는데 LATE 버전에서는 ERLY 버전의 수행이 시작되는 15시 이후에 수집된 자료를 추가적으로 자료동화에 적용하고 있다. LATE 버전에서 사용되는 수온 프로파일, SSH, 현장관측 SST 자료 개수는 각각 ERLY 버전보다 약 0.3%, 0.2%, 0.01% 감소하게 증가하며 큰 차이는 없으나, 불규칙적으로 제공에 문제가 생기는 위성 관측자료의 경우 LATE 버전을 통해 관측자료의 공백을 최소화하는 보완이 가능하다.

5. GODAPS2와 GODAPS의 분석결과 차이

GODAPS2의 안정적인 생산 결과를 확인하고 GloSea6 초기장으로 사용이 가능한지를 확인하기 위하여 구축이 완료된 후 2021년 6월부터 준현업 운영을 시작하였다. 한편, 두 시스템이 병행 운영되었던 기간 중 여름철 동안의 모델 분석결과를 간단히 상호 비교함으로써 GODAPS2의 구축 및 운영에 대해 평가하였다. 이는 GODAPS를 구축할 때와 달리 시스템을 최초로 설치하는 것이 아니므로, GODAPS2의 운영을 시작한 후 그 모의 결과를 GODAPS와 단순 비교함으로써 구축이 잘 이루어졌는가를 판단하고자 하였다. 성능을 비교평가하기에 자료의 시간적인 길이가 짧다고 판단되지만, 병행운영 기간이 2021년 6~12월로 제한적이라 이 기간에 대해서만 분석하였다. GODAPS2의 첫 수행을 위해서는 eORCA025 격자 해양-해빙 초기장이 필요하므로, 이 초기장은 영국 기상청에서 제공받

아 사용하였고, 자료동화에서는 GODAPS와 동일한 관측자료를 사용하였다. 주요 해양 및 해빙 변수에 대한 차이를 살펴보고, 자료동화시스템에서 산출된 비용함수를 비교함으로써 최소화 과정의 수렴 정도를 간단히 비교하였다.

5.1 수온, 유속, 해수면 고도 비교

먼저 해양의 주요 변수인 수온, 유속, SSH에 대해 2021년 6~8월 여름 계절평균 공간분포에 대한 모델 분석결과를 비교하였다(Fig. 5). 각 변수 왼쪽의 GODAPS2는 eORCA025 격자로 남극 방향으로 85°까지 더 확장되었기 때문에, 중앙의 GODAPS 그림보다 Ross Sea의 상당한 해역과 Weddell Sea의 매우 작은 해역까지 더 넓게 모의하고 있지만, 육안으로는 식별하기 어려운 정도로 표현되고 있다. 그렇기 때문에 각 변수의 분석장의 차이를 나타낸 가장 오른쪽 그림은 GODAPS 영역인 ORCA025에 해당하는 부분에 대해서만 표출하였다. 표층 수온은 GODAPS와의 차이가 전체적으로 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 안팎의 매우 작은 결과를 보인다(Fig. 5a). 표층 깊이에 따른 수온 평균 공간분포가 거의 같았으며, 전지구 대부분 차이가 크지 않았다(그림 생략). 그러나, 300 m 수심 수온은 표층 수온의 차이와 비교해볼 때, 전체적으로 모의된 공간 분포의 패턴이나 형태는 유사하나 그 차이에 있어서는 표층 수온보다 두드러지게 나타난다(Fig. 5b). 적도 서태평양, 인도양 아라비아해, 일본 동쪽해상, 북아메리카 동쪽해상, 남반구 고위도 해상에서 비교적 큰 차이가 나타났다. 이 같은 결과는 같은 관측자료를 사용하였으나 표층에 비해 상대적으로 깊은 수심에서의 프로파일 자료는 충분하지 않아 자료동화 효과가 크지 않아서 동일하지 않은 초기장 사용으로 생긴 차이가 표현된 것으로 사료된다.

유속 모의 결과를 비교하기 위해 동서방향의 유속 변수의 공간분포를 나타냈다(Fig. 5c). 공간 분포는 수온과 유사하게 GODAPS2 및 GODAPS 모두 비슷하게 나타났다. 다른 지역보다 적도 부근에서 상대적으로 차이가 보이긴 하지만 큰 차이 없이 안정된 결과를 생산하였다. 또한, 남북 방향의 유속에 대한 비교 결과는 생략하였으나 U-current와 비슷한 결과를 보였다. 마지막으로, SSH에서도 전지구적으로 GODAPS2는 GODAPS와 비슷한 결과를 보였다(Fig. 5d). 다만, 남극해에서 GODAPS에 비해 큰 값을 보이는데 남쪽으로 더 확장된 영역을 포함하게 되며 주요한 빙붕 아래에서의 해양순환을 모의할 수 있게 된 해양모델의 개선으로 인한 차이로 사료된다. 전체적으로 두 시스템 간 작은 차이를 보이지만, 평균적인 분포는 GODAPS와 GODAPS2가 서로 비슷하여 초기장 사용에 문제가 없을 것으로 판단된다.

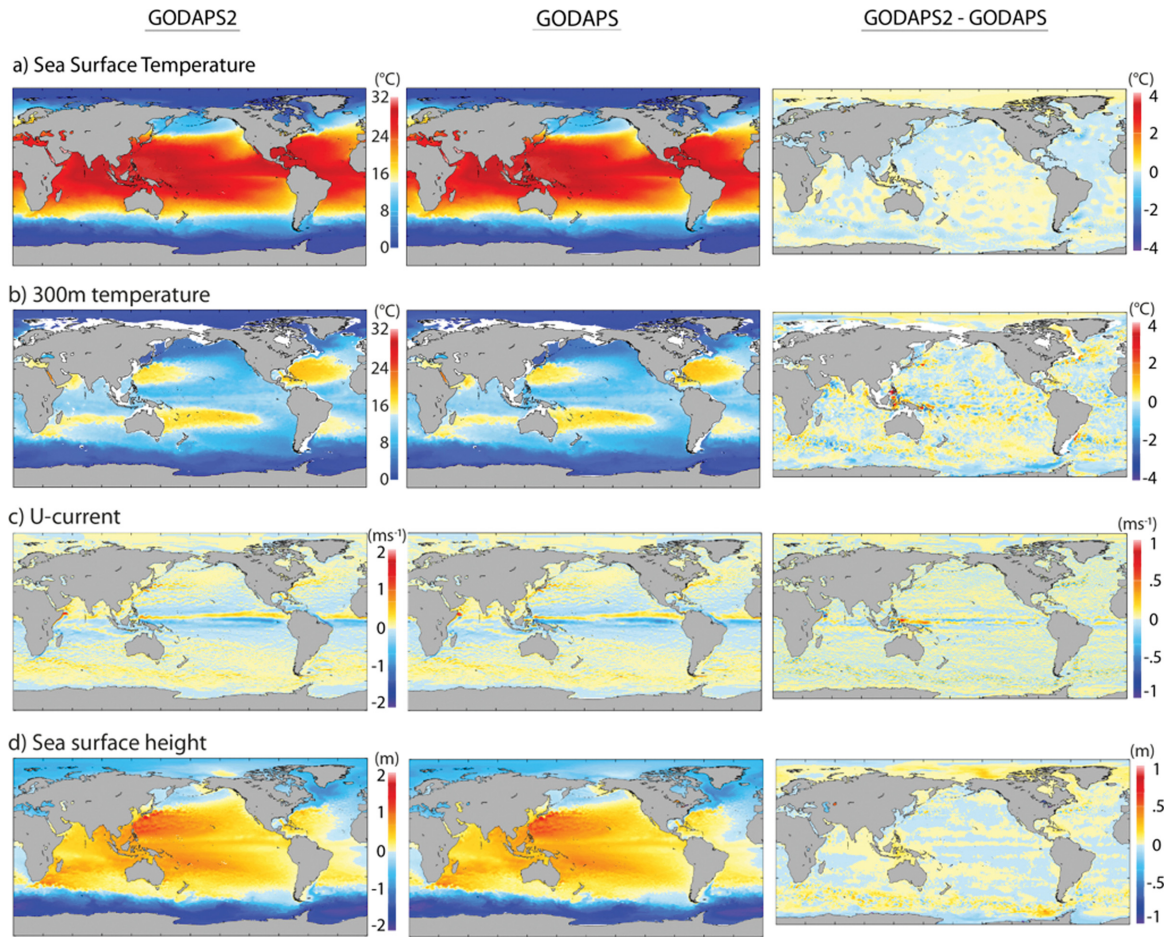


Fig. 5. Spatial distribution of the (a) SST, (b) 300 m depth temperature, (c) U-current, and (d) sea surface height produced from the GODAPS2, GODAPS, and their difference during summer 2021, respectively.

5.2 해빙 농도, 해빙 두께 비교

남극방향으로 더 확장된 eORCA025 격자를 사용하고 다층 열역학 방식을 적용하는 등 여러 가지의 해빙 모델 개선사항이 있었고 그 영향을 살펴보기 위해 해빙 농도, 해빙 두께 결과를 비교하였다. Figure 6는 GODAPS2 및 1의 해빙 농도, 해빙 두께의 여름철 계절평균과 차이를 각각 나타낸다. 해빙 농도는 GODAPS의 결과와 거의 같은 공간분포를 보이는데, 유라시아 대륙 북쪽의 Chukchi Sea, East Siberian Sea, Laptev Sea 에서는 해빙이 더 많고, Greenland 북쪽과 Canadian Archipelago 근해에서 비롯한 북극해 중심까지는 해빙이 더 높은 결과를 보여준다(Fig. 6a). 한편, 남극 주변 해양에서는 GODAPS와 달리 GODAPS2에서 확장된 격자 사용으로 인해 모든 남극 내륙연안에서 모의가 되고 있는 것이 보다 분명히 식별된다. 해빙 농도의 분석 결과는 GODAPS와 거의 유사했으며, 남극대

륙 연안에서는 해빙이 좀더 많은 반면 더 먼 바다에서는 적은 것으로 분석하고 있다. 다음, 해빙 두께를 살펴보면, 북극해에서는 그 차이가 해빙 농도와 비슷한 경향을 보였다. 남극에서는 해빙 두께의 공간분포가 서로 거의 비슷한 패턴을 보였으나 GODAPS2가 남극대륙의 연안에서만 더 큰 값을 나타내고, 대부분 해역에서는 다소 얇은 해빙 두께를 분석하고 있다(Fig. 6b). 이는 ice layer가 단일 층에서 4층으로 변경된 다층 열역학 방식을 사용하여 온도와 염도에 따라 달라지는 열용량을 가지므로 상대적으로 해빙이 빨리 녹거나 생성이 되기 때문으로 추측된다.

5.3 자료동화의 비용함수 비교

개선된 GODAPS2의 자료동화시스템인 NEMOVAR는 GODAPS에 비해 여러 내부적인 동화 기법뿐만 아니라 해양 및 해빙으로 나뉘어서 수행하는 방식으로 변

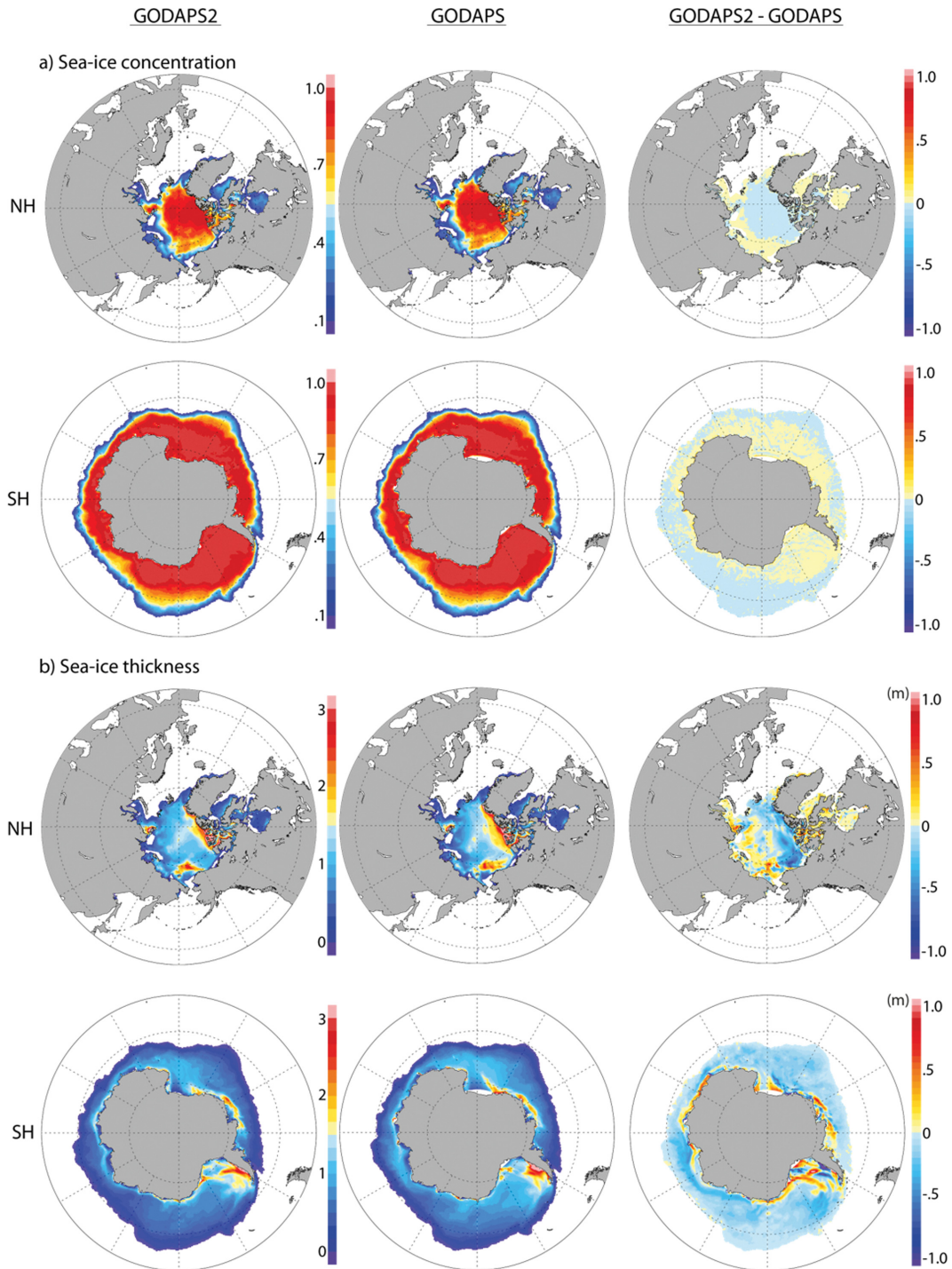


Fig. 6. The same as Fig. 5 but for sea ice concentration and sea ice thickness over Arctic and Antarctic.

경되었는데, 이 장에서는 GODAPS2와 GODAPS의 비
용합수의 비교 검증을 통해서 GODAPS2의 각각의 자

료동화 최소화 과정의 수렴 양상을 알아보려고 한다.
GODAPS2와 GODAPS가 병행 운영한 기간 중 가용

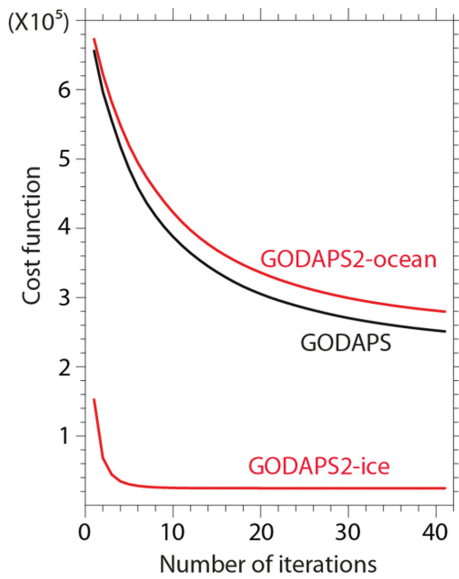


Fig. 7. Cost functions for GODAPS (black line) and ocean and sea-ice assimilation of GODAPS2 (red lines) are depicted respectively until 40 iterations of NEMOVAR minimization averaged for the assimilation period from Oct. to Dec. 2021.

한 자료동화 로그가 남아있는 2021년 10~12월 동안의 평균 비용함수의 감소 추이를 계산하였다(Fig. 7). NEMOVAR는 최소화 과정의 반복 횟수를 40회로 제한하고 있다. GODAPS2 및 GODAPS 모두 40회 반복 이후에도 안정화되지 않고, 최소점을 향해 계속 수렴하는 모습을 보이고 있다. GODAPS2의 해양 자료동화 부분은 GODAPS보다 비용함수가 높은 상태에서 시작해서 최소화 과정 마지막 단계에서도 높게 유지되고 있는데, 최종 비용함수 수치는 초기 비용함수 대비 GODAPS2는 41%, GODAPS는 39%의 값을 보여 GODAPS2가 비용함수의 감소폭이 상대적으로 작게 나타났다. 이는 해양변수만 따로 동화한 GODAPS2가 GODAPS와 직접적인 비교는 가능하지 않으나, GODAPS2의 해양자료동화가 배경장에서 좀 더 떨어진 상태에서 동화과정의 시작되고, 수렴도 상대적으로 덜 되는 것으로 나타난 것은 동화변수의 변경, 동화영역의 확장, 편차보정의 개선 및 추가 등의 요인이 복합적으로 나타난 것으로 사료된다. 한편, GODAPS2의 해빙 자료동화는 동화과정 초기에 급격히 수렴하여 10회 정도 반복 이후에는 비용함수의 변화가 없어지는 특징을 보였다. 최종 비용함수는 초기 비용함수의 16%에 지나지 않아 상당히 큰 폭으로 감소한 모습을 보여준다. 이러한 점은 해빙 자료동화의 반복횟수를 줄임으로써 계산 비용을 절감할 수 있을 것이라

판단된다.

6. 검 증

전지구 해양 및 해빙 모델 결과를 검증할 관측자료가 상당히 제한적이기 때문에, 가용한 관측자료 또는 재분석자료를 사용하여 해당 변수 몇 가지에 대해서 GODAPS2에 대한 검증을 수행하고 GODAPS의 것과 비교하였다.

6.1 SST

전지구 SST 관측자료의 검증을 위해 Storkey et al. (2018)가 해양모델의 개선에 대한 검증 시 사용한 European Space Agency Sea Surface Temperature Climate Change Initiative (ESA SST CCI) (Merchant et al., 2019) 자료를 GODAPS 및 GODAPS2의 분석장과 비교하였다(Fig. 8). GODAPS 및 GODAPS2가 병행 운영된 기간 중 가용한 6~8월의 여름철 평균 SST와 겨울철 중 12월을 비교 검증하였다. 해양모델 NEMO는 남반구 해양에서 온난편차를 유발하는 계통적 오차를 지니고 있다(Storkey et al., 2018). 여름철 평균 편차를 보면, GODAPS2는 GODAPS에 비해 이러한 남반구 해양 (Southern Ocean)에서의 오차가 상당히 줄어들었다(Figs. 8a, c). 특히 Ross Sea 주변과 남인도양을 비롯한 남반구 중고위도 해양에서의 온난편차를 상당폭 감소시키고 있었다. 이는 Storkey et al. (2018)이 언급한 해양모델에서의 등밀도면 확산계수 감소에 의한 남반구 해양 SST를 차게 만들었다는 개선사항과 일치한다. 또한, 북태평양 중고위도에서의 온난편차도 상당히 감소시키고 있으며, 우리나라 주변 해역에서도 관측에 더 가깝게 나타나고 있다. 북대서양에서도 전반적으로 관측과의 오차가 줄어든 모습을 보인다. 12월에는 여름철 평균과 마찬가지로, GODAPS2에서는 남반구 해양에서의 온난편차가 감소하여 관측에 더 가까워졌다는 사실이 가장 큰 특징이다(Figs. 8b, d). 그러나, 다른 해역에서의 뚜렷한 오차 감소는 나타나지 않고 있다. 이상의 관측검증 결과, 전반적으로 GODAPS2에서 SST의 전지구 분포가 더 개선되고 있다는 것을 보여주고 있다.

6.2 북극의 해빙 두께

겨울철 북극에서의 해빙 두께 관측자료와의 검증을 위해서, Ridley et al. (2018)가 개선된 해빙모델 결과를 검증할 때 사용한 것과 같이 CryoSat-2 위성 자료 (Tilling et al., 2016)를 사용하여 비교하였다(Fig. 9). GODAPS 및 GODAPS2가 병행운영된 겨울기간인 11월과 12월의 평균 해빙 두께를 구했으며, 겨울철에만 제공되는 CryoSat-2 위성 자료도 이 2개월의 자료를

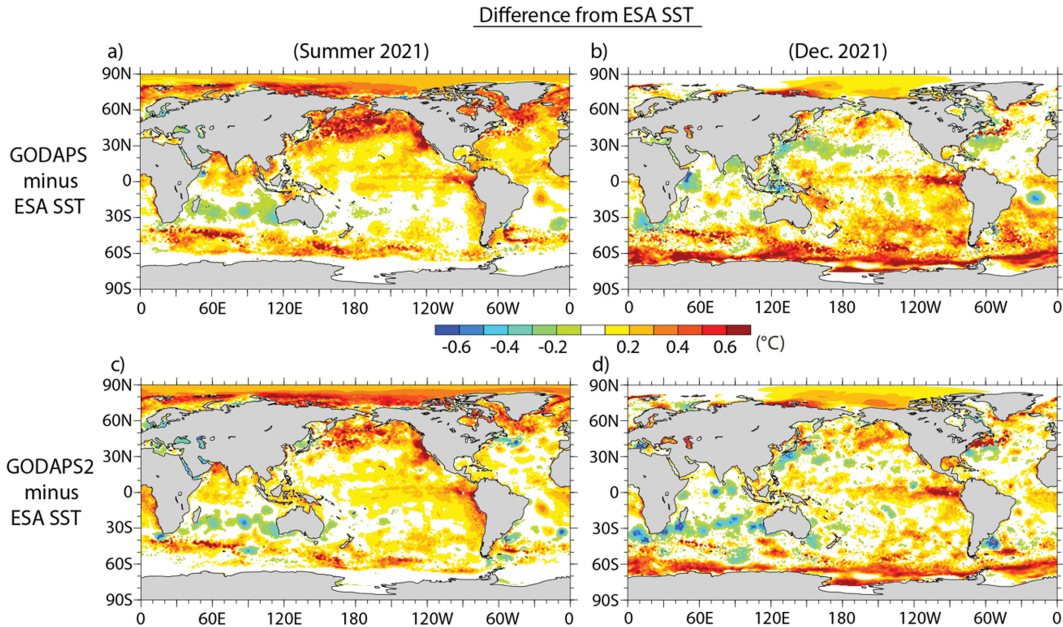


Fig. 8. Differences of GODAPS (upper panel) and GODAPS2 (lower panel) against ESA SST CCI data: (a, c) the summer (June, July and August), and (b, d) the Dec 2021, respectively.

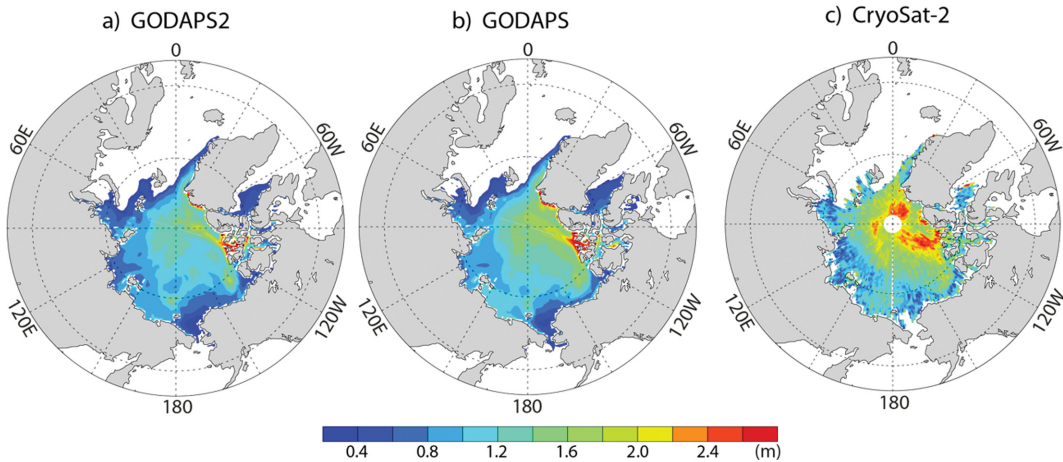


Fig. 9. Arctic sea ice thickness from (a) GODAPS2, (b) GODAPS, and (c) CryoSat-2 sea ice freeboard measurements for the mean period (November and December 2021).

평균하였다. CryoSat-2는 극궤도위성으로서 관측경로의 해당 자료를 시간 누적하여 합성한 것이므로 엄밀히 평균장이라 말할 수는 없으나, 비교할 수 있는 최상의 자료이므로 검증을 위해 채택하였다. 비교 결과, GODAPS2는 GODAPS에 비해 전반적으로 해빙 두께의 패턴은 유사하나, 해빙 두께가 다소 줄어들어 해빙이 더 얇은 것으로 분석하고 있다. 이는 Fig. 6의

여름철 해빙두께의 변화가 쌍극자패턴이 나온 것과는 다른 것이다. CryoSat-2 관측자료와 비교할 때, GODAPS2와 GODAPS 모두 Canadian Archipelago 주변의 해역과 Greenland 북극해의 두꺼운 해빙지역에서 좀더 얇아진 해빙을 모의하고 있으나, 시베리아 북부와 Chukchi Sea 부근의 적은 해빙을 대체로 잘 모의하고 있다. GODAPS2는 GODAPS에 비해 해빙이

얇은 지역에서는 관측에 더 가깝게 분석하고 있으나, 해빙이 상대적으로 두꺼운 지역에서는 그렇지 못한 것으로 나타났다. 이상의 비교 결과, GODAPS2는 GODAPS와 그 차이가 크지 않으면서 전반적으로 해빙 두께를 다소 얇게 분석하고 있었다. 한편, CryoSat-2 위성 관측자료와의 검증을 통하여, 해빙 두께의 분포는 전체적으로 관측과 유사한 분포를 보이나, GODAPS가 관측과 더 가까운 것을 알 수 있다. 그러나, Ridley et al. (2018)가 CryoSat-2 위성 자료는 단지 참고자료로만 사용한다고 지적한 것처럼, 그 절대적인 수치보다는 그 패턴을 고려하는 해석이 보다 중요할 것으로 보인다.

6.3 혼합층 깊이

해양의 보편적인 특징으로서 상층부 해양의 운동의 원인이 되는 질량, 운동량, 에너지 등의 교환을 일으키는 난류혼합 과정이 일어나는 혼합층 깊이(Mixed Layer Depth, MLD)에 대한 검증을 위하여, ECMWF에서 제공하고 있는 전구 해양 및 해빙 재분석(Ocean Reanalysis System 5; ORAS5, C3S CDS, 2021) 자료를 활용하여 2021년 여름철 평균(6~8월) 분석 결과를 비교하였다(Fig. 10). 먼저 GODAPS2는 GODAPS에 비해 적도 및 남반구 고위도에서 대체로 MLD를 더 깊게 모의하고 있으며, 반면 남반구 중위도에서는 낮게 모의하고 있다(Fig. 10a). 이는 Fig. 10a의 우측의 두 MLD의 차이에 대한 동서평균값에서도 알 수 있다. GODAPS와 GODAPS2를 재분석자료인 ORAS5와 비교한 결과, GODAPS와 GODAPS2 모두 적도 부근에서는 10~20 m 정도의 차이를 보이나, 남반구 중위도 해양에서는 GODAPS가 매우 깊은 MLD를 모의하고 있다는 점은 유사하다(Figs. 10b, c). 그러나, GODAPS2에서는 GODAPS에 비해 적도 태평양 및 대서양, 또한 인도양에서 MLD가 재분석자료 ORAS5에 더 가깝고, 남반구 해양에서도 MLD의 편차가 다소 줄어든 것으로 보인다. 이를 정량적으로 살펴보기 위해, 위의 재분석 자료에 대한 각각의 제공근 오차(root mean square error, RMSE)를 구한 후 동서평균을 하고, 이를 MLD의 동서평균값으로 정규화시켜 그 차이를 계산하였다(Fig. 10d). GODAPS2에서 GODAPS를 뺀 값이므로, 음의 값일수록 GODAPS2의 오차가 적다는 것을 뜻한다. 위의 Figs. 10b, c에서 정성적으로 살핀 바와 같이, 전구적으로 동서평균된 오차를 살펴볼 때, GODAPS2가 보다 더 우수한 분석 결과를 산출하고 있으며 특히 적도에서 그 효과가 크게 나타나고 있다. 또한, ORAS5에 비해 MLD의 편차가 매우 크게 나타난 남반구 중고위도에서도 GODAPS2가 GODAPS에 비해 대체로 오차가 더 적게 나타나고 있음을 보여주는데, 이는 GODAPS2가 Fig. 10a의 동서

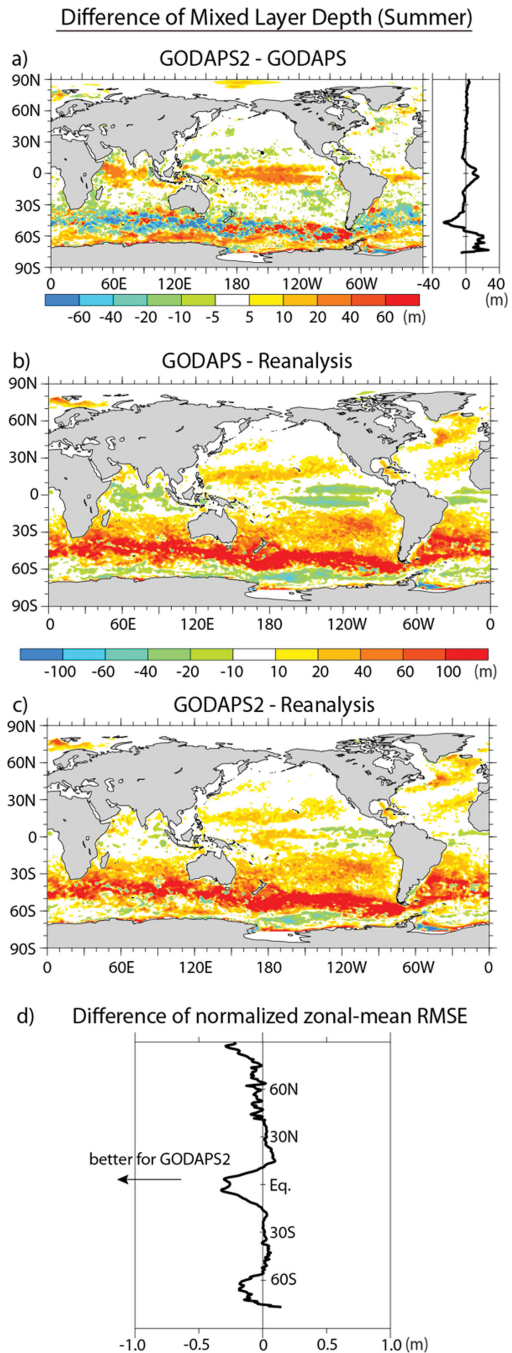


Fig. 10. Difference of summer mean (June, July, and August) mixed layer depth between (a) GODAPS and 2, (b) GODAPS and ORAS5 and (c) GODAPS2 and ORAS5. The right panel of (a) denotes the zonal-mean difference. (d) the difference of normalized zonal-mean RMSEs (RMSE between GODAPS2 and ORAS5 minus RMSE between GODAPS and ORAS5).

평균 오차에서 나타난 남반구 중위도 해양에서 MLD를 얇게 모의한 것이 크게 나쁜 영향을 주지 않으면서, 고위도 해양에서 MLD를 깊게 모의한 것은 보다 더 크게 실제에 가깝게 분석하고 있다는 것을 의미한다. 이 같은 결과는 여름철 남반구 고위도 해양에서 기후값에 비해 너무 얇게 MLD를 모의하던 것을 연직 및 등밀도 혼합계수의 조정에 의한 해양모델 개선 (Storkey et al., 2018)에 따라 더 깊게 분석하게 되었다는 결과와 일치한다.

7. 요약 및 결론

본 연구에서는 국립기상과학원에서 GloSea6 해양-해빙 초기장 자체 생산 및 제공을 목적으로 현업운영 중인 전지구 해양자료동화시스템 GODAPS2의 개선된 사항과 변경된 운영체계를 소개하였다. 또한 단기간의 모델 수행결과를 이전 버전인 GODAPS와 비교하여 안정적인 생산과 초기장으로 사용이 가능한지를 확인하였다. GODAPS2는 영국 기상청의 현업 시스템인 해양자료동화 예측모델 FOAM을 기반으로 구축이 되었는데, 기존 GODAPS는 FOAM vn13 기반이었으나 GODAPS2는 FOAM vn14.1 기반으로 업그레이드되었다. 그에 따라 시스템 구성 및 각 모델 구성요소들에 대해 더 발전된 사항들이 적용되었다.

GODAPS2의 개선사항을 간략히 정리하자면 해양-해빙 모델의 격자 체계가 eORCA025로 바뀌며 남위 77°에서 85°로 분석 영역이 확장되었고, 해양 모델이 빙봉의 패인 동공을 모의할 수 있게 되었다. 비선형 자유수면파와 가변 체적층을 적용하여 해수면 답수를 더 정확히 모의할 수 있게 되었으며, 운동량 이류 연직혼합 모수화 개선, 등밀도 확산 매개변수 조정 등으로 이전 버전의 문제였던 온난 편차를 감소시켰다. 해빙 모델에서는 기존에 해빙을 단일층으로 취급하는 열역학 방식을 사용하였으나, 4개의 해빙 층과 1개의 눈 층을 나누어서 처리하는 다층 열역학 방식을 적용하였다. 또한, 해양-해빙 항력 계수, 해빙의 가시대역 알베도를 수정하여 모델을 개선시켰다. 해양 자료동화모델에서는 변분 편차보정 방법과 관측편차에 기반한 보정방법을 결합한 새로운 편차보정 기법을 적용하였고 SSH 자료 편차보정이 추가되었다. 시스템 운영면에서는 자료동화 기간이 1일에서 2일로 늘어났으며, 해양과 해빙 자료동화가 개별적으로 운영된다.

GODAPS2의 운영체계는 기존 GODAPS에서는 Shell 기반으로 운영된 것과 달리 그래픽 인터페이스 기반인 Rose/Cylc 체계로 변경되어서 운영 안정성이 크게 향상되었고, 성능이 향상된 슈퍼컴퓨터 5호기를 사용함으로써 계산 시간이 이전 버전 대비 20~30% 단축되었다.

GODAPS2는 분석일에 해당하는 SST, SSH, 해빙 농도, 수온 프로파일 관측자료를 수집하여 자료동화한다. 각 관측자료는 서비스 제공 여부에 따라 상시 버전 업데이트 되고 있다. GODAPS2는 ERLY, LATE 버전으로 하루에 2회 수행되며 ERLY 버전이 수행되는 15시 이후에 수집되는 자료 및 제공에 문제가 생긴 위성관측자료를 처리하여 LATE 버전에 적용함으로써 해양-해빙 초기장 품질을 유지하였다.

구축이 완료된 GODAPS2의 안정적인 생산 결과를 확인하고 GloSea6 초기장으로 사용이 가능한지 적합성을 확인한 결과, 안정적으로 초기장이 생산되는 것을 확인하였다. 또한, 여러 해양 및 해빙 변수에 대한 검증 결과, 전반적으로 GODAPS2의 개선된 모습을 확인하였다.

향후 해양-해빙 초기장 품질향상을 위해 지속적으로 가용한 자료를 자료동화 과정에 추가할 예정이며, 특히 염분 위성자료를 자료동화에 적용하여 초기장의 정확도를 높여 장기 예보 성능을 향상시키고자 한다. 또한, 현재 전지구 격자를 갖고 있는 GODAPS2는 우리나라 연안을 모의하기에는 한계가 있으므로, 고해상도 지역해양모델을 구축하여 고품질의 예측장을 생산하고 예측정보를 제공함으로써 우리나라 연안 해양 예측 서비스 향상에 기여하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기후예측 현업 시스템 운영 및 개발」(KMA2018-00322)의 지원으로 수행되었습니다. 검증을 위한 SST 및 MLD 자료는 ECMWF의 Copernicus Climate Data Store 포털 (CDS)에서, CryoSat-2 해빙 두께 자료는 www.cpom.ucl.ac.uk/csop에서 입수하였다.

REFERENCES

- Amante, C., and B. W. Eakins, 2009: ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis, NOAA Technical Memorandum NES- DIS NGDC-24, 19 pp, doi:10.7289/V5C8276M.
- Balmaseda, M., and D. Anderson, 2009: Impact of initialization strategies and observations on seasonal forecast skill. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L01701, doi: 10.1029/2008GL035561.
- Barnier, B., and Coauthors, 2006: Impact of partial steps and momentum advection schemes in a global ocean circulation model at eddy-permitting resolution. *Ocean Dyn.*, **56**, 543-567, doi:10.1007/s10236-006-0082-1.
- Bigg, G. R., M. R. Wadley, D. P. Stevens, and J. A. John-

- son, 1997: Modelling dynamics and thermodynamics of icebergs. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **26**, 113-135, doi:10.1016/S0165-232X(97)00012-8.
- Bitz, C. M., and W. H. Lipscomb, 1999: An energy-conserving thermodynamic model of sea ice. *J. Geophys. Res.-Oceans*, **104**, 15669-15677, doi:10.1029/1999JC900100.
- Blockley, E. W., and Coauthors, 2014: Recent development of the Met Office operational ocean forecasting system: an overview and assessment of the new Global FOAM forecasts. *Geosci. Model Dev.*, **7**, 2613-2638, doi:10.5194/gmd-7-2613-2014.
- C3S CDS, 2021: ORAS5 global ocean reanalysis monthly data from 1958 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S), Climate Data Store (CDS). doi:10.24381/cds.67s.67e8eeb7.
- Chang, P.-H., S.-O. Hwang, S.-H. Choo, J. Lee, S.-M. Lee, and K.-O. Boo, 2021: Global Ocean Data Assimilation and Prediction System in KMA: Description and assessment. *Atmosphere*, **31**, 229-240, doi:10.14191/Atmos.2021.31.2.229 (in Korean with English abstract).
- Ducouso, N., J. L. Sommer, J.-M. Molines, and M. Bell, 2017: Impact of the “Symmetric Instability of the Computational Kind” at mesoscale-and submesoscale-permitting resolutions. *Ocean Modelling*, **120**, 18-26, doi:10.1016/j.oceanmod.2017.10.006.
- Fiedler, E., C. Mao, S. Good, J. Waters, and M. Martin, 2019: Improvements to feature resolution in the OSTIA sea surface temperature analysis using the NEMOVAR assimilation scheme. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 3609-3625, doi:10.1002/qj.3644.
- Flocco, D., D. L. Feltham, and A. K. Turner, 2010: Incorporation of a physically based melt pond scheme into the sea ice component of a climate model. *J. Geophys. Res.-Oceans*, **115**, C08012, doi:10.1029/2009JC005568.
- _____, D. Schroeder, D. L. Feltham, and E. C. Hunke, 2012: Impact of melt ponds on Arctic sea ice simulations from 1990 to 2007. *J. Geophys. Res. Oceans*, **117**, C09032, doi:10.1029/2012JC008195.
- Gaspar, P., Y. Grégoris, and J.-M. Lefevre, 1990: A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at station Papa and long-term upper ocean study site. *J. Geophys. Res. Oceans*, **95**, 16179-16193, doi:10.1029/JC095iC09p16179.
- Griffies, S. M., and Coauthors, 2015: Impacts on ocean heat from transient mesoscale eddies in a hierarchy of climate models. *J. Climate*, **28**, 952-977, doi:10.1175/JCLI-D-14-00353.1.
- Hollingsworth, A., P. Kållberg, V. Renner, and D. M. Burridge, 1983: An internal symmetric computational instability. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 417-428, doi:10.1002/qj.49710946012.
- Hunke, E. C., W. H. Lipscomb, A. K. Turner, N. Jeffery, and S. Elliot, 2015: CICE: the Los Alamos sea ice model, documentation and user’s manual version 5.1, Los Alamos National Laboratory, USA, LA-CC-06-012, [Available online at https://svn-ccsm-models.cgd.ucar.edu/cesm1/alphas/branches/cesm1_5_alpha04c_timers/components/cice/src/doc/cicedoc.pdf].
- IOC, IHO and BODC, 2003: Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, Liverpool, UK.
- Kim, H., J. Lee, Y.-K. Hyun, and S.-O. Hwang, 2021: The KMA Global Seasonal forecasting system (GloSea6) - Part 1: Operational system and improvements. *Atmosphere*, **31**, 341-359, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.341 (in Korean with English abstract).
- Madec, G., 2016: NEMO ocean engine. *Note du Pôle de modélisation de l’Institut Pierre-Simon Laplace No 27*, [Available online at <https://www.nemo-ocean.eu/doc/>].
- Marsh, R., and Coauthors, 2015: NEMO-ICB (v1.0): interactive icebergs in the NEMO ocean model globally configured at eddy-permitting resolution. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 1547-1562, doi:10.5194/gmd-8-1547-2015.
- Martin, M. J., and Coauthors, 2017: Recent developments in global ocean data assimilation using NEMOVAR at the Met Office. GOV DA-TT meeting, La Spezia. [Available online at https://www.godae.org/~godae-data/OceanView/Events/DA-OSEval-TT-2017/2.2-FOAMDA_MM_Oct2017.pdf].
- Mathiot, P., A. Jenkins, C. Harris, and G. Madec, 2017: Explicit representation and parametrised impacts of under ice shelf seas in the z* coordinate ocean model NEMO 3.6. *Geosci. Model Dev.*, **10**, 2849-2874, doi:10.5194/gmd-10-2849-2017.
- Merchant, C. J., and Coauthors, 2019: Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications. *Sci. Data*, **6**, 223, doi:10.1038/s41597-019-0236-x.
- Mirouze, I., and A. T. Weaver, 2010: Representation of correlation functions in variational assimilation using and implicit diffusion operator. *Quart. J. Roy. Meteor.*

- Soc.*, **136**, 1421-1443, doi:10.1002/qj.643.
- Ridley, J. K., E. W. Blockley, A. B. Keen, J. G. L. Rae, A. E. West, and D. Schroeder, 2018: The sea ice model component of HadGEM3-GC3.1. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 713-723, doi:10.5194/gmd-11-713-2018.
- Rodgers, K. B., and Coauthors, 2014: Strong sensitivity of Southern Ocean carbon uptake and nutrient cycling to wind stirring. *Biogeosciences*, **11**, 4077-4098, doi:10.5194/bg-11-4077-2014.
- Semtner Jr, A. J., 1976: A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate. *J. Phys. Oceanogr.*, **6**, 379-389, doi:10.1175/1520-0485(1976)006<0379:AMFTTG>2.0.CO;2.
- Storkey, D., and Coauthors, 2018: UK Global Ocean GO6 and GO7: a traceable hierarchy of model resolutions. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 3187-3213, doi:10.5194/gmd-11-3187-2018.
- Thorndike, A. S., D. A. Rothrock, G. A. Maykut, and R. Colony, 1975: The thickness distribution of sea ice. *J. Geophys. Res.*, **80**, 4501-4513, doi:10.1029/JC080i033p04501.
- Tilling, R. L., A. Ridout, and A. Shepherd, 2016: Near-real-time Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2, *The Cryosphere*, **10**, 2003-2012, doi:10.5194/tc-10-2003-2016.
- Walters, D. N., and Coauthors, 2019: The Met Office Unified Model Global Atmosphere 7.0/7.1 and JULES Global Land 7.0 configurations. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 1909-1963, doi:10.5194/gmd-12-1909-2019.
- Waters, J., M. J. Bell, M. J. Martin, and D. J. Lea, 2017: Reducing ocean model imbalances in the equatorial region caused by data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 195-208, doi:10.1002/qj.2912.
- Weaver, A. T., C. Deltel, E. Machu, S. Ricci, and N. Daget, 2005: A multivariate balance operator for variational ocean data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3605-3625, doi:10.1256/qj.05.119.
- While, J., and M. J. Martin, 2019: Variational bias correction of satellite sea-surface temperature data incorporating observations of the bias. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 2733-2754, doi:10.1002/qj.3590.
- Williams, K. D., and Coauthors, 2017: The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) configurations. *J. Adv. Model. Earth Sys.*, **10**, 357-380, doi:10.1002/2017MS001115.