Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 29, No. 1 (2019) pp. 87-103
https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.1.087
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

기 술 노 트
(Technical Note)

중간복잡도 지구시스템모델 LOVECLIM을 이용한 과거 6천년 기후 변화 모의

전상윤*
극지연구소 북극해빙예측사업단

(접수일: 2019년 1월 16일, 수정일: 2019년 2월 21일, 게재확정일: 2019년 2월 24일)

Simulation of Past 6000-Year Climate by Using the Earth System Model of Intermediate Complexity LOVECLIM

Sang-Yoon Jun*
Unit of Arctic Sea-ice Prediction, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea

(Manuscript received 16 January 2019; revised 21 February 2019; accepted 24 February 2019)

Abstract This study introduces the overall characteristics of LOVECLIM version 1.3, the earth system model of intermediate complexity (EMIC), including the installation and operation processes by conducting two kinds of past climate simulation. First climate simulation is the equilibrium experiment during the mid-Holocene (6,000 BP), when orbital parameters were different compared to those at present. The overall accuracy of simulated global atmospheric fields by LOVECLIM is relatively lower than that in Coupled Model Intercomparison Project phase 5 (CMIP5) and Paleoclimate modelling Intercomparison Project phase 3 (PMIP3) simulations. However, surface temperature over the globe, the 800 hPa meridional wind over the mid-latitude coastal region, and the 200 hPa zonal wind from LOVECLIM show similar spatial distribution to those multi-model mean of CMIP5/PMIP3 climate models. Second one is the transient climate experiment from mid-Holocene to present. LOVECLIM well captures the major differences in surface temperature between preindustrial and mid-Holocene simulations by CMIP5/PMIP3 multi-model mean, even though it was performed with short integration time (i.e., about four days in a single CPU environment). In this way, although the earth system model of intermediate complexity has a limit due to its relatively low accuracy, it can be a very useful tool in the specific research area such as paleoclimate.

Key words: EMIC, LOVECLIM, mid-Holocene, paleoclimate modeling

1. 서 론

기후모델은 미래 기후의 예측, 과거 기후의 재현 연구에서 널리 사용되고 있는 중요한 연구 도구의 하나이다. 특히 과거 기후를 재현하는 연구의 경우, 여러 물리 변수들을 시공간 격자에 균질하게 표현할 수 있는 수치모델의 특성이 고기후 프록시(proxy) 자료가 갖는 계절적 편향성, 자료의 비균질성 등의 시공간적인 제약을 보완할 수 있다. 고기후 연구에서도 다양한 수치모델을 이용한 고기후 모델링이 활용되고 있으며, 여러 모델의 과거 재현 결과의 불확실성을 평가하기 위한 상호 비교 연구인 고기후모델링 간 상호비교 프로젝트(Paleoclimate Modelling Intercomparison Project; PMIP)가 1995년부터 지속적으로 진행되고 있다(Kohfeld and Harrison, 2000; Braconnot et al., 2007,

*Corresponding Author: Sang-Yoon Jun, Unit of Arctic Sea-ice Prediction, Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Korea.
Phone: +82-32-760-5371, Fax: +82-32-760-5399
E-mail: syjun@kopri.re.kr

2012; Kageyama et al., 2018).

한편 고기후모델링에서는 긴 시간규모의 변동성을 살펴보는 고기후 연구의 특성상 다른 기후모델링 연구 분야에 비하여 상대적으로 장기간의 적분 수행이 필요하다. 그리고 이러한 적분은 전통적 수치모델들이 갖는 병렬 확장성의 한계로 인하여 장시간의 수치연산을 필요로 한다. 수치연산 기술의 발전과 연산 자원의 증가는 기후모델의 시공간적인 해상도의 향상에 기여하였고, 기후모델의 자연 현상의 모의수준 역시 더욱 정교하고 상세하게 개선되어 왔다. 일반적으로 같은 양의 연산 자원을 사용하였을 때, 수치모델의 해상도, 표현하는 물리과정의 상세 수준, 총 적분시간의 곱은 일정량을 유지하는 것으로 알려져 있다(Claussen et al., 2002). 이러한 수치모델의 특성은 연산 기술의 증가와 연산 자원의 증대에도 불구하고 긴 시간 규모의 실험의 수행을 어렵게 하였다.

일부 기후모델은 해상도를 낮추고 물리 과정들을 간소화하여 긴 시간 규모의 기후 실험을 수행하여 왔다(Jacob et al., 2001; Smith, 2012). 특히 중간복잡도 지구시스템모델(earth system model of intermediate complexity; EMIC)은 이러한 철학으로 개발된 간소화된 물리 과정과 낮은 해상도를 갖는 모델이다. 하지만 중간복잡도 지구시스템모델의 물리과정 및 해상도의 간소화 정도는 정해 있지 않기 때문에, 중간복잡도 지구시스템모델들의 모의 수준은 편차가 크게 나타난다. 예를 들어 Eby et al. (2013)의 중간복잡도 모델간 상호비교 연구에서 정리된 총 15개의 중간복잡도 지구시스템모델을 살펴보면, 대기모델의 경우 2차원 단층 에너지 균형 모델부터 연직 3층 준지균 근사 방정식계 모델, 연직 11층 3차원 정역학 방정식계 모델까지 다양한 종류가 존재한다. 또한 생지화학모델과 육빙모델의 경우 몇몇 중간복잡도 지구시스템모델에서만 활용되고 있는 등 중간복잡도 지구시스템모델을 구성하는 하부 모델의 종류도 다양하다. 그럼에도 불구하고 이 모델들이 모의한 최근 천년 기후 변화 실험 결과에서는 알려진 전지구적인 강제력 변화에 따른 전구 기후의 온도 반응과 경향성이 일관적으로 나타나고 있다(Eby et al., 2013; IPCC, 2014).

따라서 중간복잡도 지구시스템모델은 최신의 기후모델에 비하여 간소화된 과정과 낮은 해상도를 갖지만, 전구 규모의 외부강제력이 고려되는 고기후 연구 등 장기간의 기후 변화 모의가 필요한 연구에서 중간복잡도 지구시스템모델은 유용한 도구로 활용되고 있다. 특히 상대적으로 정교한 중간복잡도 지구시스템모델들의 경우 자오선 역전순환, 몬순 등 주요 지역적 기후 현상의 장기 변화 연구에도 널리 활용되고 있다(Renssen et al., 2006; Sundaram et al., 2012; Caley et al., 2014). 이렇듯 과거 기후 재현, 미래 기후 예측 등의 기후 연구, 교육 등에서 다양하게 활용될 수 있음에도 불구하고 중간복잡도 지구시스템을 이용한 국내 연구는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 기술 노트에서는 중간복잡도 지구시스템모델 중 대기 모의 과정이 상대적으로 정교한 모델의 하나인 LOVECLIM (LOch-Vecode-Ecbilt-CLio-agIsm Model)을 이용한 두 종류의 실험을 수행하여 모델의 설정과 운영 방법에 대하여 소개하려고 한다. Eby et al. (2013)에서 정리된 15종의 중간복잡도 지구시스템모델들 중 LOVECLIM은 여러 연직 대기층을 갖고 대기의 흐름을 역학적으로 모의하는 4종의 모델 중 하나이다. 본 기술 노트에서는 먼저 이 LOVECLIM의 특징, 설치, 운영에 대하여 소개하고, 6천년전의 평형기후실험과 6천년전부터 현세까지의 점진적 기후변화실험을 수행하여 이 실험 사례들을 통해 LOVECLIM 모의 결과의 특성 등에 대하여 살펴볼 것이다.

2. LOVECLIM 구성 및 운영 환경

2.1 LOVECLIM 구성 및 특징

LOVECLIM은 대기, 해양, 지면, 해양탄소순환, 육빙모델로 구성된 중간복잡도 지구시스템모델이다(Goosse et al., 2010). 준지균 근사방정식에 근거한 3차원 대기모델 ECBILT (Opsteegh et al., 1998)와 3차원 정역학계 해양 및 열역학 해빙 모델 CLIO (Goosse and Fichefet, 1999), 지면식생모델 VECODE (Brovkin et al., 1997), 육빙모델 AGSIM (Huybrechts, 2002), 해양 탄소 및 생지화학모델 LOCH를 구성모델로 가지며, 과거 주요 기후 모의(Goosse et al., 2010; Nikolova et al., 2013), Heinrich 이벤트(Menviel et al., 2008; Chikamoto et al., 2012; Weber et al., 2014), 제4기 기후 변동 복원(Funder et al., 2011; Timmermann et al., 2013; Liu et al., 2014) 등의 다양한 고기후 연구에 활용되어 왔다.

LOVECLIM의 1.2 버전의 특징과 구성모델들, 그리고 각 구성모델들이 사용하는 지배 방정식계 등에 대한 상세한 설명은 위에 언급된 각 구성모델들의 논문과 Goosse et al. (2010)에서 찾을 수 있다. 한편 현재 LOVECLIM 웹사이트(https://www.elic.ucl.ac.be/modx/index.php?id=81)를 통해 배포되는 소스코드는 1.3 버전이다. 이 1.3 버전에서는 해양탄소순환 모델 LOCH과 육빙모델 AGISM 모델의 소스코드는 포함되어 있지 않으며 사용을 위해서는 두 모델의 개발자에게 직접 소스코드를 구해야 한다. Figure 1에서는 현재 배포되고 있는 1.3 버전의 소스 구조에 대하여 간략히 정리하였다. 소스코드는 모델의 소스코드가 있는 LOVECLIM 디렉토리, 실행 스크립트 및 실험 수행 디렉토리가 생성되는 RUN 디렉토리, 전처리 및 후처

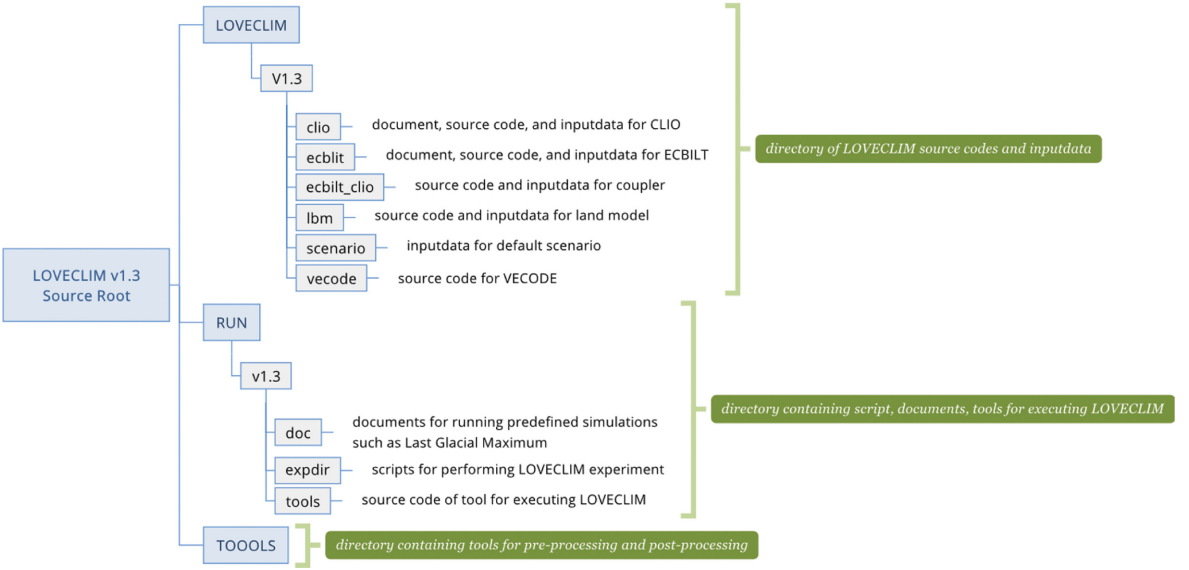

Fig. 1. Source code structure of LOVECLIM version 1.3 and its brief description.

리용 도구가 있는 TOOOLS 디렉토리의 3개의 주요 디렉토리로 구성된다.

이러한 1.3 버전 소스코드에서 운영 가능한 대기모델, 해양모델, 해빙 및 식생모델의 특징을 간략히 기술하면, 대기모델 ECBILT는 준지균 잠재와도 방정식을 수평 T21, 연직 800, 500, 200 hPa 3층 해상도 격자에서 계산하여 대규모 대기흐름을 모의한다. 수증기량은 500 hPa 층에만 정의되어 있으며 강수 과정은 500 hPa 이하 고도에서 포화수증기량이 임계치에 도달하는 경우와, 수증기가 건조대기로 가정되는 500 hPa 이상의 고도에 도달하는 경우에 발생한다. 이외의 주요 물리과정으로는 Chou and Neelin (1996) 장파 복사, 선형화된 단파 복사 과정, Held and Suarez (1978) 대류 과정, bulk formula 기반 현열 및 잠열, 단층 토양수분 기반 지면 모델이 있다.

해양 및 해빙 모델 CLIO는 해양의 흐름을 모의하기 위하여 Navier-Stokes 방정식을 Boussinesq 및 정역학 근사를 통해 얻어진 원시방정식(primitive equation)을 사용한다. 또한 Gent and Mcwilliams (1990)에서 제안된 아격자 규모 에디에 의한 온위 및 염분 확산 과정이 포함되어 있으며, 아격자 규모의 연직 혼합은 Goosse and Fichefet (1999)에서 제안된 Mellor and Yamada 2.5층 모델(Mellor and Yamada, 1982) 기반 연직 혼합 모수화 과정을 사용한다. 격자 시스템은 수평 전구 3도 기반 Arakawa B-grid, 연직 z-coordinate 기반 20층으로 구성되며, 이중 수평격자 시스템은 북극의 특이점을 피하기 위하여 남극해, 태평양, 인도해, 남대서양 지역을 담당하는 전통적인 위경도 구면 격자시스템과, 북극해와 북대서양 지역을 담당하는 구면격자 시스템을 대서양 적도지역에서 연결하는 방식으로 구성된다. Figure 2에서 수심 입력자료를 이용하여 표현된 이러한 CLIO의 수평격자시스템의 구조를 살펴볼 수 있다. 북극해와 북대서양 지역을 담당하는 격자시스템의 수심은 붉은 색, 다른 격자시스템의 수심은 파란 색으로 표현되어 있다. 두 격자시스템은 대서양 지역에서만 인접해 있으며 베링해에서는 연결되어 있지 않다. 따라서 태평양과 대서양 간의 베링해를 통한 해수의 흐름은 북극해와 북태평양의 연결 지점의 해수면고도의 차이와 지균 조절 이론을 이용하여 간접적으로 계산된다.

한편 CLIO의 해빙은 해양과 동일한 수평 격자상에 해빙과 개빙 구역(open-water) 비율로 모의되며, 각 격자에서는 해빙지역의 눈과 해빙 사이의 전도에 의한 열 교환과 현열 저장 과정이 눈 1층, 해빙 2층의 총 연직 3층에서 계산된다. 그리고 해빙 두께 및 면적 비율의 변화는 측면과 상하 경계층에서의 에너지 수지 방정식을 통해 계산된다.

식생모델 VECODE은 대기모델과의 접합을 위해 고안된 모델로, 전구 역학식생모델(dynamic global vegetation model)의 간소화 형태이다. 식생기능유형(plant functional type; PFT)을 계산하는 식생구조모델, 순일차생산량(net primary production; NPP)을 담당하는 생지화학모델, PFT에 근거한 격자의 식생형태를 결정하는 역학식생모델으로 구성된다. PFT는 나무(trees)와 초지(grasses)의 두 종류가 사용되며, 나무와 초지가 아닌 지역은 사막으로 분류된다. 식생의 탄소

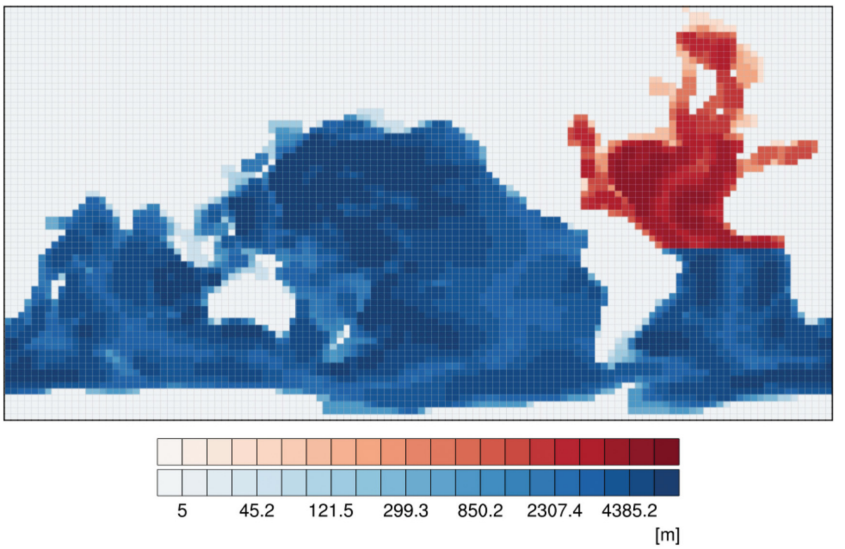

Fig. 2. Grid system of CLIO represented by global bathymetry distribution. Blue region indicates the first spherical sub-grid system based on classical longitude-latitude coordinates. Red region indicates the second spherical sub-grid system rotated with two poles located at the equator (111°W and 69°E) for covering the North Atlantic and the Arctic.

량은 잎(leaves) 등의 녹색 생물체(green biomass), 줄기(stems) 및 뿌리(roots) 등의 구조 생물체(structural biomass), 나무 잔여물(woody residues), 부식질(humus) 4종의 저장소에 의해 축적된다. NPP는 경험식 기반 모수화 방안에 따라 계산되고 식생 면적에 따라 보정된다.

2.2 운영환경

LOVECLIM은 FORTRAN 코드로 작성되어 있으며, 컴파일과 실행을 위해서는 UNIX/LINUX 기반 환경과 C 및 FORTRAN 컴파일러, 수치 연산과 파일 입출력 등을 위한 관련 라이브러리가 필요하다. 부록에서는 필수 라이브러리의 종류와 이 연구에서 사용된 LOVECLIM 1.3버전을 위한 컴파일 과정을 수록하였다. LOVECLIM은 병렬 환경이 아닌 단일 프로세서 환경에서 동작하도록 개발되었으며, 본 연구에서 수행한 실험들은 인텔 Xeon gold 6128 3.4 GHz CPU, 64 GB RAM의 단일 프로세서 환경에서 하루 약 1,500년 정도의 적분이 수행되었다.

2.3 모델 실행

모델의 실행을 위해서는 RUN/V1.3/expdir 경로의 실험 설정 파일의 여러 매개 변수(parameter)들을 수행하려는 실험에 맞게 수정하여야 한다. 위 경로에 존재하는 기본 실험 설정 파일은 exp.param이며, Table 1에 이 실험 설정 파일에서 일반적인 기후실험을 위해 사용되는 주요 변수들의 목록을 정리하였다. 이 실험 설정 파일을 생성하여 실험 설정에 맞게 수정한 뒤 동일 경로에 존재하는 newexp 스크립트를 이용하면 지정된 실험이름(texp 매개변수에 지정한 값)을 가진 하위 디렉토리가 실험 수행을 위한 스크립트들이 함께 생성된다. 이 실행 스크립트들은 100년 실험당 1개씩 생성되는데, 각 스크립트는 담당하는 100년 실험 수행을 완료하면 다음 100년 실험 수행을 담당하는 다음 스크립트를 자동적으로 실행하도록 되어 있다. 따라서 첫 번째 실험 스크립트인 launch_r1을 실행하는 것으로 설정한 기간의 전체 실험을 수행할 수 있다. 실험결과는 실험 진행 중에는 지정한 임시 디렉토리(Scratchdir 매개 변수에 지정한 값)에 저장되며 실험이 완료된 뒤 원격지(SavingHost 매개 변수를 지정한 경우)나 동일 서버의 지정된 저장소 경로(SavingPath 매개변수에 지정한 값)으로 이동된다.

각 모델의 실험시 계수 등의 세부 설정을 담는 입력 설정 파일과 출력 변수의 종류를 지정하는 출력 설정 파일들의 원형 파일들은 RUN/V1.3/expdir/ref/repo 디렉토리에 존재한다. 이 파일들 중 대기모델, 해양모델, 식생모델, 해양화학모델, 육빙모델의 설정 파일의 주요 매개 변수의 설명은 앞서 언급한 Goosse et al. (2010)에서 살펴볼 수 있다. 또한 대기모델 경우 매개 변수에 대한 상세한 설명이 소스코드 디렉토리의 TEX 형식의 파일에 작성되어 있다. 새로운 실험 디렉토리가 생성될 때 이 repo 디렉토리가 이 생성된 실험 디렉토리에 복사되며, 따라서 이 RUN/V1.3/

Table 1. Major parameters in experiment parameter file of LOVECLIM v1.3.

Parameter name	Description
texp	experiment name
Scratchdir	scratch path
SavingHost	storage host name
SavingPath	storage path
start_y	starting year
start_d	starting day
initdate	parameter for adjusting the starting point of the experiment. The starting day in the experiment is calculated as difference between the starting day composed from values of the parameters of *start_y* and *start_d*, and value of this *initdate*.
scenGHG	directory name for greenhouse gases forcing in the LOVECLIM/V1.3/scenario
ghg	activation flag for greenhouse gases forcing 1: activated, 0: deactivated, 2: 2 times CO_2 run
ghg2s	start year for 2 times CO_2 run (*ghg* = 2)
sul	activation flag for sulfate forcing 1: activated, 0: deactivated
o3	activation flag for O_3 forcing 1: activated, 0: deactivated
scenTSI	directory name for total solar irradiance forcing in the LOVECLIM/V1.3/scenario
tsi	activation flag for total solar irradiance forcing 1: activated, 0: deactivated
scenVolc	directory name for volcanoes forcing in the LOVECLIM/V1.3/scenario
vol	activation flag for volcano forcing 1: activated, 0: deactivated
scenVeget	directory name for vegetation forcing in the LOVECLIM/V1.3/scenario
veg	activation flag for vegetation forcing 1: activated, 0: deactivated
vegs	start year for vegetation forcing when vegetation forcing activated
scentopo	directory name for topography in the LOVECLIM/V1.3/scenario
scenimsk	directory name for ice-sheet mask in the LOVECLIM/V1.3/scenario
imsk	activation flag for ice-sheet mask forcing 1: activated, 0: deactivated
scenfwf	directory name for fresh water fluxes forcing in the LOVECLIM/V1.3/scenario
fwf	activation flag for fresh water fluxes forcing 1: activated, 0: deactivated
cel	type of orbital forcing 0: deactivated, 1: solar insolation change based on Berger (1978), 2: high frequency solar insolation change based on Bretagnon (1982)
eccf	eccentricity for solar insolation
oblf	obliquity for solar insolation
omwebf	angular precession for solar insolation
hyst	activation flag for hysteresis run of CLIO 1: activated, 0: deactivated

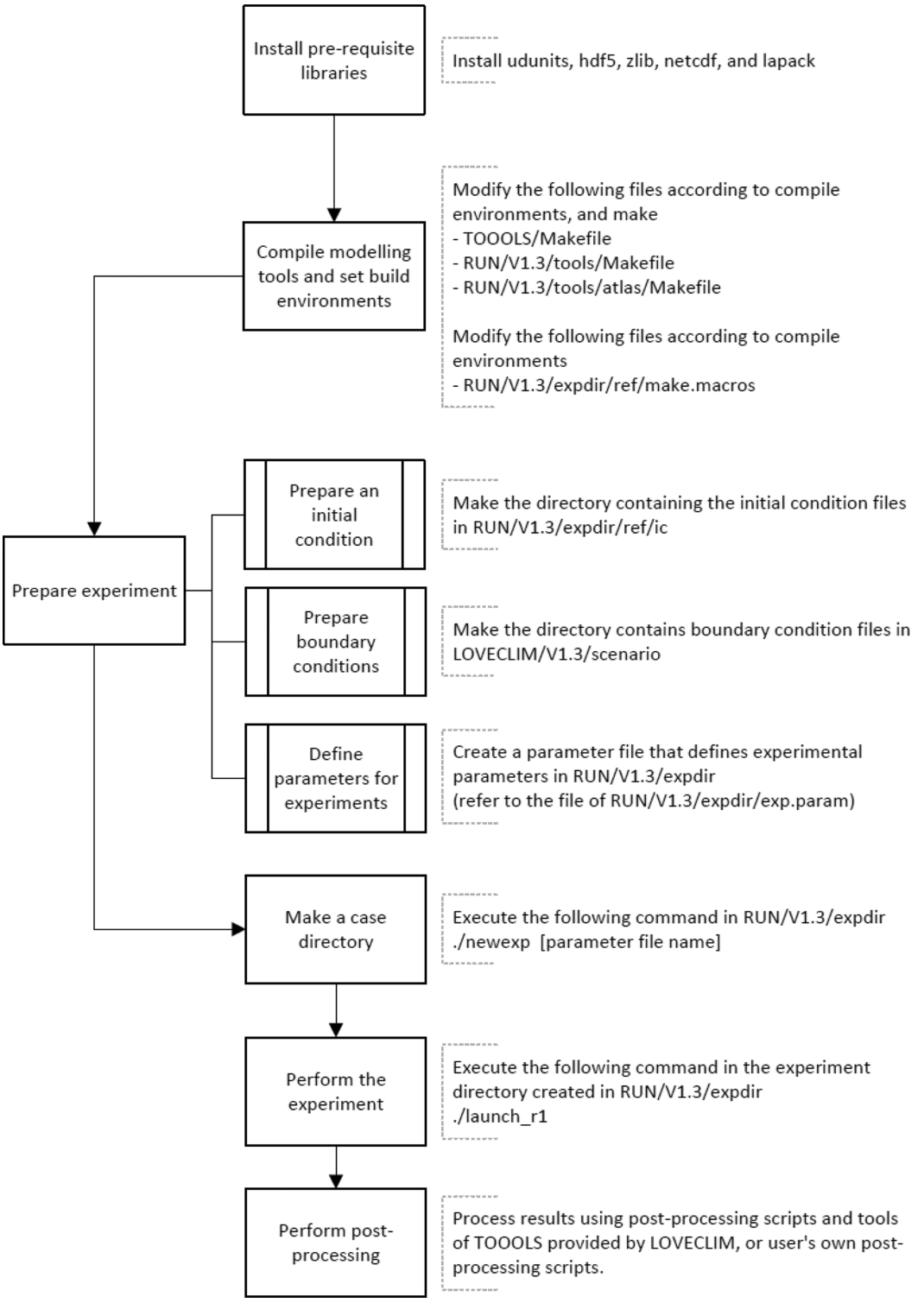

Fig. 3. Flow chart of installation, pre-process, execution, and post-process for climate experiment with LOVECLIM version 1.3.

expdir/ref/repo 디렉토리 파일들의 내용을 수정하면 이후 생성되는 모든 실험에 공통적인 설정을 적용할 수 있다. 또한 각 실험 디렉토리에 복사된 설정 파일의 내용을 수정하는 것으로 각 실험에 다른 설정을 적용할 수 있다.

실험을 위한 기본 초기조건은 RUN/V1.3/expdir/ref/ic 경로에 있다. 이 경로에는 1950년을 시작년으로 설정된 실험을 위한 ic001949_360 디렉토리가 기본으로 존재한다. 만약 실험 시작년도를 2000년으로 하는 경우(실험 설정에서 start_y 매개변수의 값이 2000) ic001999_360 디렉토리가 필요하다. 그리고 이 초기조건 디렉토리의 파일들은 LOVECLIM의 기후 실험에서 생성되는 실험 재시작 파일들과 동일하다. 따라서 다른 기후 실험에서 생성되는 재시작 파일들을 이용하여 초기조건 파일들을 쉽게 생성할 수 있다.

한편 실험을 위한 경계조건은 LOVECLIM/V1.3/scenario 경로에 디렉토리 별로 생성할 수 있다. 이 경로에는 최근 천년 실험을 위한 경계조건들을 담은 Default 디렉토리가 기본적으로 존재한다. 실험 설정 파일에서 scen으로 시작하는 매개 변수들(scenGHG, scenTSI, scenVolc 등)에 지정된 문자열 값들은 위 경로에서 이 문자열의 디렉토리에 존재하는 파일 들을 입력자료로 사용한다. 예를 들어 scenGHG의 값이 Default인 경우, LOVECLIM/V1.3/scenario/Default 경로에 있는 GHG.dat 파일에 있는 온실기체 값을 입력자료로 사용한다. 기본 디렉토리인 Default 디렉토리의 README 파일에는 이 입력파일들의 종류가 정리되어 있다. Figure 3에서는 지금까지 살펴본 실험 수행 과정의 주요 단계별 흐름을 정리하였다.

Table 2. Brief description of experimental design for mid-Holocene simulation.

Type	Setting
Orbital parameters	eccentricity = 0.018682 obliquity = 24.105° angular precession = 0.87°
Greenhouse gases	CO_2 = 280 ppm CH_4 = 650 ppb N_2O = 270 ppb CFC = 0 O_3 = 0
Solar constant	1365 W m^{-2}
Ice-sheet	same as preindustrial
Topography and coastlines	same as preindustrial

3. 기후실험 수행 및 결과

3.1 홀로세 중기(mid-Holocene) 평형 기후 실험

홀로세 중기 실험은 현재 기후의 지면 및 해양 지

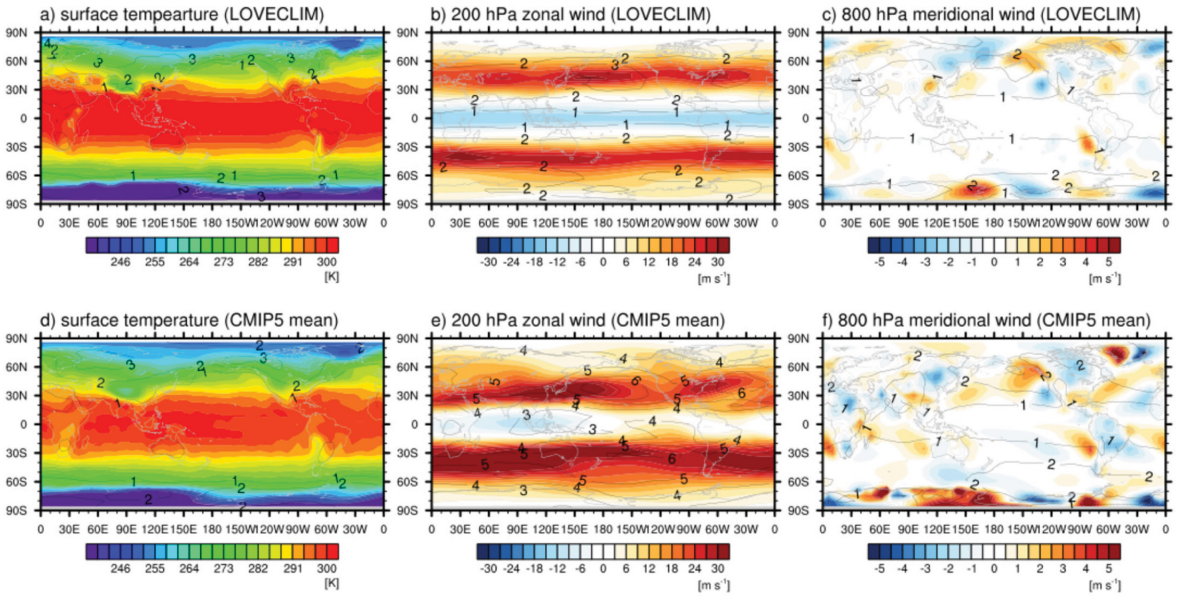

Fig. 4. Annual mean values (shading) and standard deviation (contour) of (a) surface temperature, (b) 200 hPa zonal wind, and (c) 800 hPa meridional wind from LOVECLIM mid-Holocene experiment. (d, e, and f) Same as (a, b, and c) but for the multi-model mean mid-Holocene scenario simulations by 6 CMIP5 models.

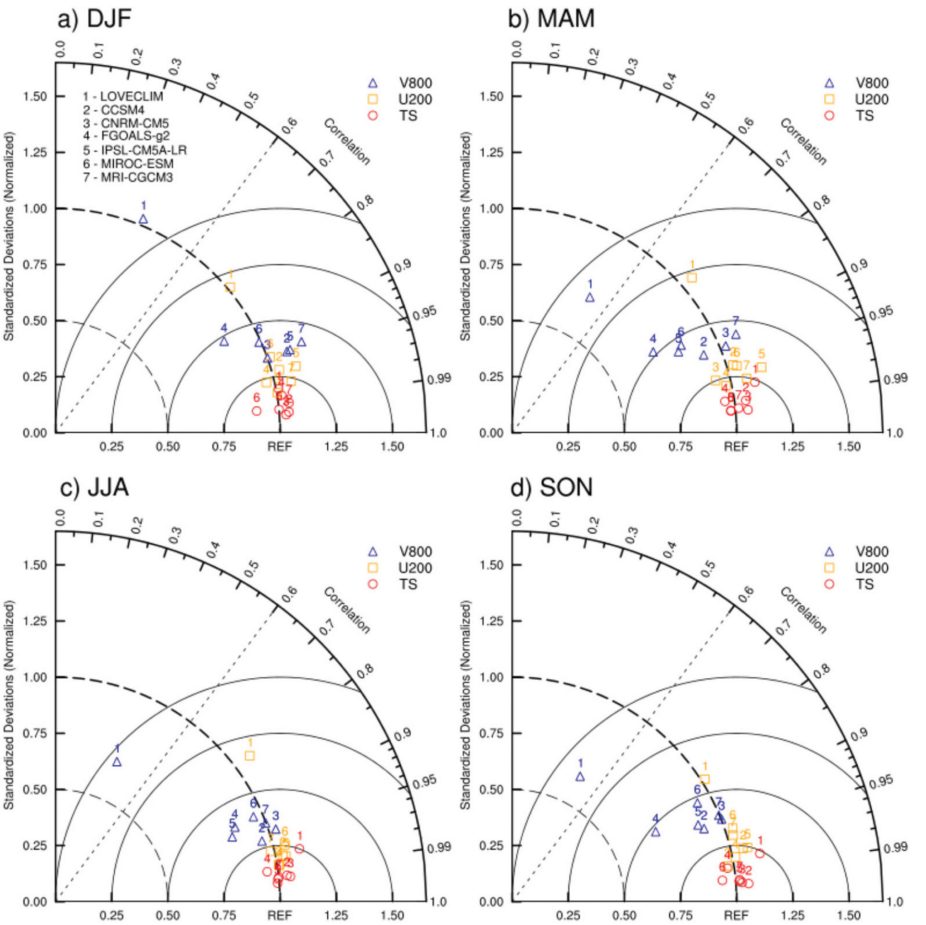

Fig. 5. (a) Taylor diagram of December-January-February (DJF) surface temperature (red circle), 200 hPa zonal wind (yellow square), 800 hPa meridional wind (blue triangle) of mid-Holocene simulation results by 7 models (LOVECLIM, and 6 CMIP5 models) compared to CMIP5 multi-model mean values. (b, c, and d) Same as (a) but for March-April-May (MAM), June-July-August (JJA) and September-October-November (SON) values, respectively.

형조건으로 모의될 수 있는 가장 이전 시기의 기후 실험이며(Hewitt and Mitchell, 1996), PMIP의 1차부터 4차까지의 모든 단계에서 수행되어오고 있는 주요 평형기후실험의 하나이다(Kageyama et al., 2018). 5차 접합모델간 상호 비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project phase 5; CMIP5) 및 PMIP3에서 제공되는 홀로세 중기 조건을 사용하여 5,000년간의 평형 기후 실험을 수행하였다. 이 실험에서 사용한 지구공전궤도, 온실기체, 지형 등의 실험 조건들은 Table 2에 정리되어 있다.

Figure 4는 LOVECLIM의 홀로세 중기 평형실험 결과의 마지막 100년과 CMIP5/PMIP3의 CCSM4, CNRM-CM5, FGOALS-g2, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, MRI-CGCM3 총 6종 모델들의 홀로세 중기(mid-Holocene) 시나리오 실험의 각 100년 결과를 모델 간 평균한 지면온도, 200 hPa 동서방향 바람, 800 hPa 남북방향 바람의 평균 분포와 경년 변동에서의 표준편차의 분포이다. 앞서 2장에서 설명한 바와 같이 LOVECLIM의 대기모델의 연직격자는 200, 500, 800 hPa 3층으로 구성되어있기 때문에 800 hPa 바람장을 비교 분석에 사용하였다. LOVECLIM은 연평균 지면온도의 위도 및 육지 분포에 따른 전구 분포와, 고위도 및 대륙지역에서 높게 나타나는 변동성의 분포 등의 기본적인 특성을 잘 모의하고 있다. CMIP5/PMIP3 모델들의 홀로세 중기 실험 모의 평균과 비교하였을 때 LOVECLIM은 적도 지역을 더 온난하게 모의하고 북극 지역은 상대적으로 한랭하게 모의하고 있다(Figs. 4a, d). 200 hPa 동서방향 바람의 경우 LOVECLIM은

북반구와 남반구 중위도에서 강하게 나타나는 편서풍 지역과 이 북반구의 북태평양과 북대서양에서 편서풍의 변동성이 크게 나타나는 특성을 잘 모의하고 있다. 그러나 CMIP5/PMIP3 모의 결과의 평균에 비하여 풍속과 변동성이 모두 약하게 모의되며, 남반구의 변동성 역시 분포와 강도가 다르게 나타난다. 또한 CMIP5/PMIP3 모의 결과에 비하여 동서방향 바람의 경도 방향의 대칭성이 매우 강하게 나타난다. 또한 800 hPa 남북방향 바람은 CMIP5/PMIP3 모의 결과에 비하여 적도 및 아열대지역에서 풍속이 매우 약하게 나타난다. 이러한 LOVECLIM의 적도지역의 약한 남북방향 바람의 모의 특성은 준지균 근사 방정식계를 사용함에 따른 특성으로 추정된다. 한편 유라시아 및 북미, 남미, 아프리카 등 중위도 대륙 연안의 800 hPa 남북방향 바람의 분포는 CMIP5/PMIP3에서 모의되는 분포가 상대적으로 잘 모의되고 있다. 이러한 LOVECLIM의 대륙 연안에서의 하층 바람장의 상대적으로 높은 모의정확도에 따라 여러 고기후 몬순 연구들이 수행된 바 있다(Yin et al., 2008; Sundaram et al., 2012; Nikolova et al., 2013; Caley et al., 2014).

이러한 LOVECLIM의 정량적인 모의 특성을 지면온도, 200 hPa 동서방향 바람, 800 hPa 남북방향 바람의 LOVECLIM 결과와 6종의 CMIP5/PMIP3 모델 들의 홀로세 중기 실험들의 6개 모델의 앙상블 평균에 대한 계절별 공간상관도와 표준편차의 비율을 나타낸 테일러 다이어그램(Taylor diagram; Taylor, 2001)을 통해 살펴보았다(Fig. 5). 각 변수들의 공간상관도와 표준편차의 비율의 분포는 전 계절에서 공통적인 특성이 나타나는데, 모든 모델들에서 지면온도(붉은색 원), 200 hPa 동서방향 바람(노란색 네모), 800 hPa 남북방향 바람(파란색 세모) 순으로 낮아진다. 특히 LOVECLIM의 경우 모든 계절에서 다른 모델들에 비하여 모의정확도가 낮게 나타나며, 지면온도의 경우 다른 CMIP5/PMIP3 모델들과 비교하였을 때 유사한 모의정확도를 보이지만 200 hPa 동서방향 바람, 800 hPa 남북방향 바람의 경우 낮은 정확도를 보인다. 200 hPa 동서방향 바람의 경우 분포의 편차는 CMIP5/PMIP3의 평균과 유사하나, 0.95 이상의 공간상관도를 갖는 CMIP5/PMIP3 모델들에 비하여 북반구 가을(*pcorr* = 0.84), 북반구 여름(*pcorr* = 0.80), 북반구 겨울(*pcorr* = 0.77), 북반구 봄(*pcorr* = 0.76) 순으로 공간상관도가 낮게 나타난다. 800 hPa 남북방향 바람의 경우 다른 CMIP5/PMIP3 모델들은 약 0.9 정도의 공간상관도를 보이며 모의정확도가 다른 변수에 비하여 더 낮지만, LOVECLIM의 경우 특히 0.4~0.5 정도로 상관관계가 특히 낮고, 표준편차의 비율 역시 북반구 겨울철을 제외하고 크게 낮아지는 특성을 보인다.

3.2 홀로세 중기-현세 점진적 기후변화 실험

LOVECLIM을 이용하여 홀로세 중기부터 현재까지의 점진적 기후변화 실험을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 홀로세 중기와 현세는 지형조건의 변화가 거의 없으며, 지구공전궤도에 의한 태양복사량은 홀로세 중기부터 산업혁명기 이전까지는 북반구 여름철의 경우 북극지역을 중심으로 지속적으로 감소하고 남반구 여름철의 경우 남반구 고위도 지역에서 약 2,000 BP까지는 증가하다가 이후 감소하는 것으로 알려져 있다(Lorenz and Lohmann, 2004; Wanner et al., 2008). 이에 따라 산업혁명기 이전 지형 조건을 전 기간에 사용하고, 홀로세 중기(6,000 BP)부터 서기 1950년(0 BP)까지 지구공전궤도 변화에 따른 태양복사량의 변화를 Berger (1978)에 따라 계산하였다. 지구공전궤도 변수의 초기값은 Table 2에 정의된 홀로세 중기 평형실험과 같다. 한편 온실기체와 태양상수는 Fischer and Jungclaus (2011)의 홀로세 중기-현세 점진적 기후변화 실험과 마찬가지로 홀로세 중기의 값을 전 실험기간에서 사용하였으며 이 값들은 Table 2에 정리되어 있다.

이 점진적 실험 결과에서 나타난 홀로세 중기부터 현재까지의 지면온도의 전구, 북반구 및 남반구의 평균 변화를 육지와 해양 지역을 나누어 살펴보았다(Fig. 6). 먼저 전구 평균 온도의 경우 6천년간 –0.41 K의 감소 경향을 보이며 이러한 감소에는 북반구 여름철(June-July-August; JJA), 특히 육지 지역의 변화가 크게 기여한다(6천년간 –1.34 K). 북반구 겨울철(December-January-February; DJF)은 이러한 감소 경향이 매우 약하게 나타나며(6천년간 –0.05 K), 육지 지역의 경우 오히려 증가하는 경향을 보인다(6천년간 0.17 K). 전구 해양 지역의 6천년간의 평균 변화 경향성은 6천년간 –0.35 K으로 전구 평균 변화 경향성과 유사하며, 특히 육지 지역과는 다르게 여름 –0.47 K, 겨울 –0.19 K로 두 계절 모두 감소하는 경향을 보인다.

북반구 지역을 살펴보면 앞서 언급한 바와 같이 이 시기 크게 감소하는 JJA의 태양복사량에 따라 JJA 북반구 평균 온도의 6천년간의 감소 경향은 북반구 전체 –1.04 K, 북반구 육지 –1.52 K, 북반구 해양 –0.56 K로 나타난다. DJF 역시 육지와 해양 모두 온도가 감소하며, 해양 지역의 경우 상대적으로 큰 경년 변동성과 함께 감소한다. 이에 따라 북반구 연평균 지면온도는 6천년간 –0.52 K로 전구 평균 지면온도의 감소 경향을 상회한다.

남반구의 경우 북반구 지역에 비하여 감소 경향성은 상대적으로 약하게 나타나며(6천년간 –0.29 K) 이러한 감소 경향은 JJA의 변화가 주도하는 것으로 나타난다(6천년간 –0.56 K). 이에 반해 DJF의 경우 6천년간 0.07 K로 오히려 증가하는 경향성을 보인다. 남

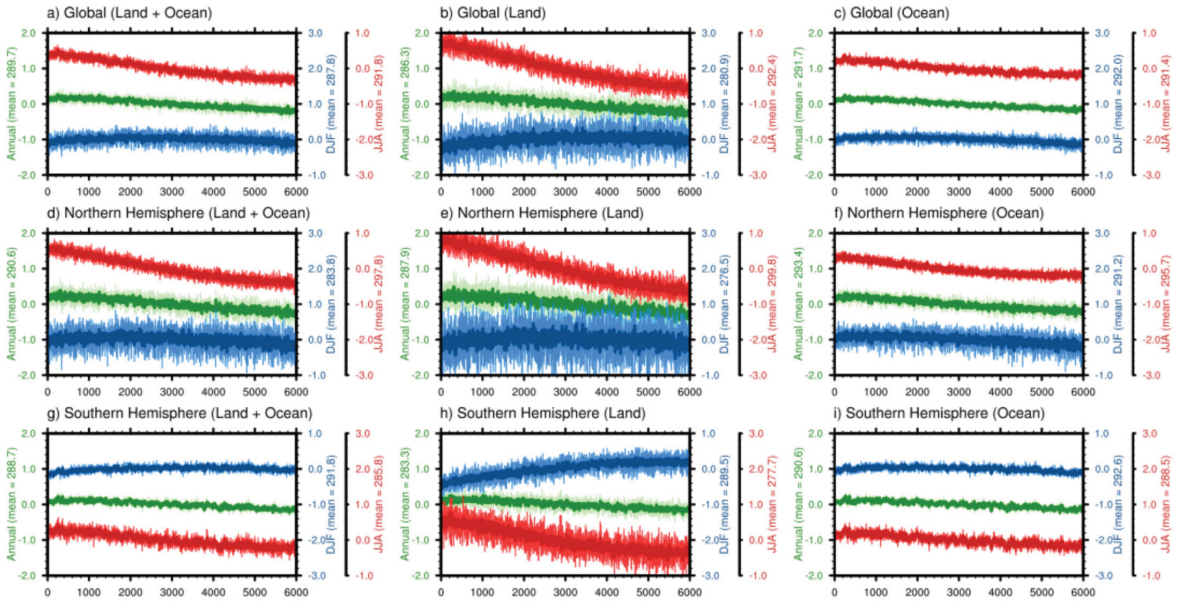

Fig. 6. Time series of annual (green), boreal winter (December-January-February, blue), and boreal summer (June-July-August, red lines)-mean surface temperature anomalies averaged over (a) the globe, (b) Northern Hemisphere, and (g) Southern Hemisphere from mid-Holocene (6 kyr BP) to present (0 BP) by LOVECLIM transient climate simulation. Area-averaging for the land and ocean is considered separately (shown by middle and right panels).

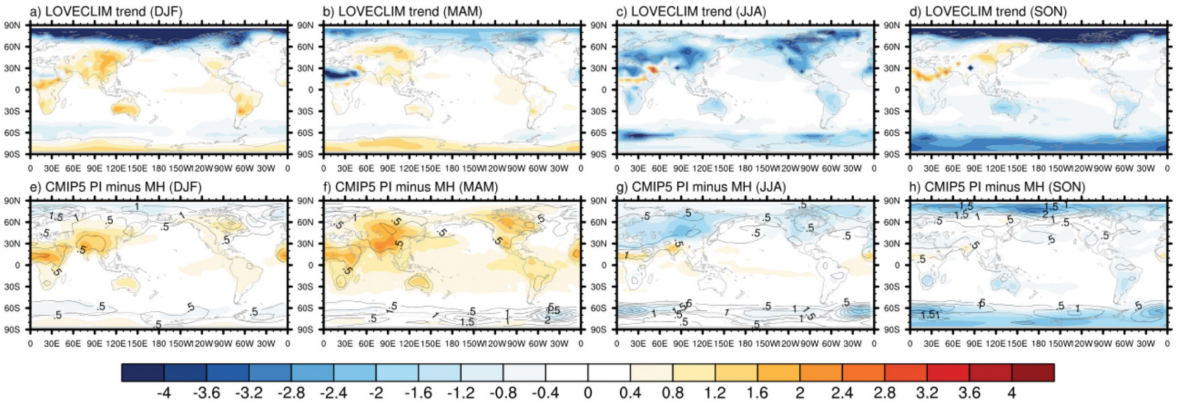

Fig. 7. (upper panels) Linear trend in seasonal-mean surface temperature [K year^{-1} × 6,000] of the LOVECLIM transient climate simulation from mid-Holocene (6 kyr BP) to present (0 BP), and (lower panels) multi-model mean surface temperature difference [K] between preindustrial and mid-Holocene scenario simulations by 6 CMIP5 models. Contour lines in bottom panels indicate standard deviation of 6 models. December-January-February, March-April-May, June-July-August and September-October-November seasons are considered from left to right panels.

반구 육지 지역의 경우, DJF는 태양복사의 증가에 따라 온도가 증가하는 경향을 보이지만(6천년간 0.63 K), JJA의 강한 감소 경향(6천년간 –1.00 K)으로 인하여 연평균은 감소하는 특성(6천년간 –0.32 K)을 보인다.

이러한 LOVECLIM의 6천년간의 지면온도 변화의 분포 특성을 CMIP5/PMIP3에 참여한 6종의 모델들이 모의한 홀로세 중기 기후와 산업혁명기 이전 기후의 차이와 비교하여 살펴보았다(Fig. 7). 먼저 LOVECLIM의 경우 DJF의 강한 감소 경향은 북극지역에서 기인하는 것으로 나타나는데, 이러한 북극지역 DJF의 한랭화 경향은 CMIP5/PMIP3 모델들이 모의하는 두 시기의 차이에서도 나타난다. 특히 LOVECLIM의 경우

모든 계절에 북극지역은 온도가 감소하는 경향성을 보이며, 특히 북반구 가을철(September-October-November; SON)에도 매우 강한 한랭화 경향성이 나타난다. 한편 이러한 LOVECLIM의 북극지역 모의 경향성은 북반구 봄철(March-April-May; MAM)에 CMIP5/PMIP3 모의 결과와 다소 다르게 나타나는데(Figs. 7b, f), CMIP5/PMIP3 모델들의 경우 MAM의 북극 모의에서 모델간 모의 편차가 존재하며 CNRM-CM, MRI-CGCM3는 한랭화, FGOALS-g2, MIROC-ESM의 경우 온난화를 모의한다(figure not shown).

앞서 육지와 해양별 평균 지면온도 변화 경향성에서 살펴본 바와 같이 북극해를 제외한 지역에서는 육지 지역에서 해양 지역에 비하여 큰 경향성이 나타난다. DJF 육지 지역의 경우 LOVECLIM과 CMIP5/PMIP3 평균에서 모두 대부분 지역에서 온난화 경향이 나타난다(Figs. 7a, e). 해양의 경우 LOVECLIM은 적도 동태평양 지역과 쿠로시오 지역에서 온난화 경향과 남극해 지역에서 한랭화 경향을 모의하는데, 이러한 분포 특성은 CMIP5/PMIP3 평균에서도 동일하게 나타난다. MAM의 경우 LOVECLIM은 북아프리카 일부와 중동 지역, 알래스카를 제외한 대부분 지역에서 지면온도의 증가를 모의하는데, CMIP5/PMIP3의 평균에서는 육지 전 지역에서 증가가 나타나고 있다. 해양 지역의 경우 LOVECLIM의 변화 경향은 CMIP5/PMIP3 평균에 비하여 약하게 나타나지만, 적도 서태평양 지역과 쿠로시오 남쪽의 강한 해수면온도 증가지역은 잘 모의되고 있다. JJA의 경우 북반구 전 대륙지역에서의 한랭화 경향성이 LOVECLIM과 CMIP5/PMIP3에서 공통적으로 나타나고 있으며, 중아프리카와 중동 지역의 온난화도 공통적으로 나타나고 있다. 한편 해양지역의 경우 북태평양과 남극해 지역의 한랭화는 동일하게 나타나나, 적도 지역의 경향성은 약간 다르게 나타난다. SON의 경우 북극과 남극지역의 강한 한랭화 경향성이 LOVECLIM과 CMIP5/PMIP3에서 동일하게 나타나고 있으며, 남반구 전지역의 변화 경향성 역시 매우 유사하게 모의되고 있다. 북반구 육지의 경우 LOVECLIM에서는 유라시아 동안과 북아프리카 지역에서 온난화 경향성을 모의하지만 CMIP5/PMIP3 평균에서는 이러한 특성이 나타나지 않는다. 한편 LOVECLIM이 온난한 모의 특성을 보이는 이 육지 지역은 CMIP5/PMIP3에서도 모델마다 다양한 모의 특성을 보이는 지역이다(Figs. 7d, h).

4. 요 약

이 기술 노트에서는 중간복잡도 지구시스템모델의 하나인 LOVECLIM의 1.3 버전의 특성과 설치 및 운영 방법을 살펴보았으며, 두 종류의 홀로세의 기후 실험을 수행하고 그 결과를 기존 CMIP5/PMIP3실험결과와 비교, 분석하였다. 이 연구에서 수행된 홀로세 중기 평형기후실험과 홀로세 중기부터 현재까지의 점진적 기후변화 실험 결과를 CMIP5/PMIP3 실험 결과와 비교하여 살펴본 결과, 연직 3층의 준지균 근사 방정식을 사용하는 LOVECLIM의 대기모델은 지면대기온도, 200 hPa 동서방향 바람, 800 hPa 남북방향 바람의 전구 분포의 공간상관도와 편차에서 CMIP5/PMIP3에 참여한 최신의 기후모델들에 비하여 상대적으로 낮은 대기장의 모의정확도를 보였지만, 전구 지면온도의 분포 및 변화, 대륙 연안 지역의 800 hPa 바람장, 200 hPa 동서방향 바람장 등은 최신의 기후모델과 유사한 모의 특성을 보였다. 특히 최근 6천년간의 장기 기후변화 실험은 단일 CPU 환경에서 약 4일 정도의 적분을 통해 수행되었음에도 CMIP5/PMIP3 기후모델들에서 모의된 두 시기의 지면온도의 주요한 차이를 잘 모의하고 있는 것으로 나타났다.

이렇듯 중간복잡도 지구시스템모델은 상대적으로 낮은 정확도로 인하여 범용적인 연구 도구로 활용되기에는 한계가 있지만, 고기후 등 특정 분야의 연구에서는 매우 유용한 연구 도구로 활용될 수 있다. 이러한 활용성은 중간복잡도 지구시스템모델을 이용한 여러 연구 결과들에서도 살펴볼 수 있으며, 이 기술노트에서 소개된 LOVECLIM의 특성 및 설치 과정이 LOVECLIM을 이용한 다양한 국내 연구에 기여할 수 있길 기대한다.

감사의 글

이 연구는 극지연구소 신진연구자 지원과제 “기후모델을 이용한 지난 6천년간의 북극 해빙 변화 모의 연구(PE18280)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Berger, A. L., 1978: Long-term variations of daily insolation and quaternary climatic changes. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 2362-2367.

Braconnot, P., and Coauthors, 2007: Results of PMIP2 coupled simulations of the mid-Holocene and Last Glacial Maximum - Part 1: experiments and large-scale features. *Clim. Past*, **3**, 261-277.

_____, S. P. Harrison, M. Kageyama, P. J. Bartlein, V. Masson-Delmotte, A. Abe-Ouchi, B. Otto-Bliesner, and Y. Zhao, 2012: Evaluation of climate models using palaeoclimatic data. *Nat. Clim. Change*, **2**, 417-424.

Bretagnon, P., 1982: Theory for the motion of all the planets - The VSOP82 solution. *Astron. Astrophys.*, **114**,

278-288.

Brovkin, V., A. Ganopolski, and Y. Svirezhev, 1997: A continuous climate-vegetation classification for use in climate-biosphere studies. *Ecol. Model.*, **101**, 251-261.

Caley, T., D. M. Roche, and H. Renssen, 2014: Orbital Asian summer monsoon dynamics revealed using an isotope-enabled global climate model. *Nat. Commun.*, **5**, 5371, doi:10.1038/ncomms6371.

Chikamoto, M. O., L. Menviel, A. Abe-Ouchi, R. Ohgaito, A. Timmermann, Y. Okazaki, N. Harada, A. Oka, and A. Mouchet, 2012: Variability in North Pacific intermediate and deep water ventilation during Heinrich events in two coupled climate models. *Deep-Sea Res. Pt. II*, **61**, 114-126, doi:10.1016/j.dsr2.2011.12.002.

Chou, C., and J. D. Neelin, 1996: Linearization of a longwave radiation scheme for intermediate tropical atmospheric models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **101**, 15129-15145.

Claussen, M., and Coauthors, 2002: Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models. *Clim. Dynam.*, **18**, 579-586.

Eby, M., and Coauthors, 2013: Historical and idealized climate model experiments: an intercomparison of Earth system models of intermediate complexity. *Clim. Past*, **9**, 1111-1140, doi:10.5194/cp-9-1111-2013.

Fischer, N., and J. H. Jungclaus, 2011: Evolution of the seasonal temperature cycle in a transient Holocene simulation: orbital forcing and sea-ice. *Clim. Past.*, **7**, 1139-1148, doi:10.5194/cp-7-1139-2011.

Funder, S., and Coauthors, 2011: A 10,000-Year Record of Arctic Ocean Sea-Ice Variability—View from the Beach. *Science*, **333**, 747-750, doi:10.1126/science.1202760.

Gent, P. R., and J. C. Mcwilliams, 1990: Isopycnal Mixing in Ocean Circulation Models. *J. Phys. Oceanogr.*, **20**, 150-155.

Goosse, H., and T. Fichefet, 1999: Importance of ice-ocean interactions for the global ocean circulation: A model study. *J. Geophys. Res. Oceans*, **104**, 23337-23355.

_____, and Coauthors, 2010: Description of the Earth system model of intermediate complexity LOVECLIM version 1.2. *Geosci. Model Dev.*, **3**, 603-633, doi: 10.5194/gmd-3-603-2010.

Held, I. M., and M. J. Suarez, 1978: A Two-Level Primitive Equation Atmospheric Model Designed for Climatic Sensitivity Experiments. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 206-229.

Hewitt, C. D., and J. F. B. Mitchell, 1996: GCM Simulations of the Climate of 6 kyr BP: Mean Changes and Interdecadal Variability. *J. Climate*, **9**, 3505-3529.

Huybrechts, P., 2002: Sea-level changes at the LGM from ice-dynamic reconstructions of the Greenland and Antarctic ice sheets during the glacial cycles. *Quaternary Sci. Rev.*, **21**, 203-231.

IPCC, 2014: *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 1535 pp.

Jacob, R., C. Schafer, I. Foster, M. Tobis, and J. Anderson, 2001: Computational Design and Performance of the Fast Ocean Atmosphere Model, Version One. *Computational Science - ICCS 2001*. In V. N. Alexandrov et al. Ed., ICCS 2001, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 175-184.

Kageyama, M., and Coauthors, 2018: The PMIP4 contribution to CMIP6 - Part 1: Overview and over-arching analysis plan. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 1033-1057, doi:10.5194/gmd-11-1033-2018.

Kohfeld, K. E., and S. P. Harrison, 2000: How well can we simulate past climates? Evaluating the models using global palaeoenvironmental datasets. *Quaternary Sci. Rev.*, **19**, 321-346.

Liu, Z., and Coauthors, 2014: The Holocene temperature conundrum. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **111**, E3501-E3505, doi:10.1073/pnas.1407229111.

Lorenz, S. J., and G. Lohmann, 2004: Acceleration technique for Milankovitch type forcing in a coupled atmosphere-ocean circulation model: method and application for the Holocene. *Clim. Dynam.*, **23**, 727-743.

Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys.*, **20**, 851-875.

Menviel, L., A. Timmermann, A. Mouchet, and O. Timm, 2008: Meridional reorganizations of marine and terrestrial productivity during Heinrich events. *Paleoceanography*, **23**, PA1203.

Nikolova, I., Q. Yin, A. Berger, U. K. Singh, and M. P. Karami, 2013: The last interglacial (Eemian) climate simulated by LOVECLIM and CCSM3. *Clim. Past*, **9**, 1789-1806, doi:10.5194/cp-9-1789-2013.

Opsteegh, J. D., R. J. Haarsma, F. M. Selten, and A. Kattenberg, 1998: ECBILT: a dynamic alternative to mixed boundary conditions in ocean models. *Tellus A*, **50**, 348-367.

Renssen, H., H. Goosse, and R. Muscheler, 2006: Coupled climate model simulation of Holocene cooling events: oceanic feedback amplifies solar forcing. *Clim. Past*, **2**, 79-90.

Smith, R. S., 2012: The FAMOUS climate model (versions XFXWB and XFHCC): description update to version XDBUA. *Geosci. Model Dev.*, **5**, 269-276, doi:10.5194/gmd-5-269-2012.

Sundaram, S., Q. Z. Yin, A. Berger, and H. Muri, 2012: Impact of ice sheet induced North Atlantic oscillation on East Asian summer monsoon during an interglacial 500,000 years ago. *Clim. Dynam.*, **39**, 1093-1105, doi:10.1007/s00382-011-1213-z.

Taylor, K. E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **106**, 7183-7192.

Timmermann, A., T. Friedrich, O. E. Timm, M. O. Chikamoto, A. Abe-Ouchi, and A. Ganopolski, 2013: Modeling Obliquity and CO2 Effects on Southern Hemisphere Climate during the Past 408 ka. *J. Climate*, **27**, 1863-1875, doi:10.1175/JCLI-D-13-00311.1.

Wanner, H., and Coauthors, 2008: Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Sci. Rev.*, **27**, 1791-1828.

Weber, M. E., and Coauthors, 2014: Millennial-scale variability in Antarctic ice-sheet discharge during the last deglaciation. *Nature*, **510**, 134-138, doi:10.1038/nature13397.

Yin, Q., A. Berger, E. Driesschaert, H. Goosse, M. F. Loutre, and M. Crucifix, 2008: The Eurasian ice sheet reinforces the East Asian summer monsoon during the interglacial 500 000 years ago. *Clim. Past*, **4**, 79-90.

부 록

이 부록에서는 LOVECLIM 1.3 버전의 설치 과정을 설명한다. 이 연구에서 사용된 환경은 인텔 Xeon Gold 6128 3.4 GHz CPU, 64 GB RAM, CentOS 7 기반 리눅스(커널 3.10.0-862.3.2.el7.x86_64)이며, 컴파일러는 Intel Composer 2013 버전을 사용하였다. 먼저 LOVECLIM의 1.3 버전의 README 파일에는 다음과 같은 컴파일러와 라이브러리 실행 환경을 제안하고 있다.

```
Example of configuration

  Compiler: intel Version 12.0.4.191 Build 20110427
  OS: linux 2.6.37.6-0.5 x86_64 GNU/Linux

Requires

  - udunits (1.12.11)
  CC=icc CFLAGS='-Df2cFortran -fPIC' ./configure --prefix=/opt/udunits

  - hdf5 (latest)
    FC=ifort F77=ifort CXX=icc CC=icc CPP='icpc -E' CXXCPP='icpc -E' CFLAGS='-Df2cFortran -fPIC' ./
configure --prefix=/opt/hdf5 --enable-fortran --enable-cxx

  - netcdf (4.1.3)
    FC=ifort F77=ifort CXX=icc CC=icc CPP='icpc -E' CXXCPP='icpc -E' CFLAGS='-Df2cFortran -fPIC'
CPPFLAGS="-I/opt/hdf5/include" LIBS="-L/opt/hdf5/lib64" ./configure --prefix=/opt/netcdf --enable-netcdf4

  - udunits2 (latest)
    FC=ifort F77=ifort CXX=icc CC=icc CPP='icpc -E' CXXCPP='icpc -E' CFLAGS='-Df2cFortran -fPIC' ./
configure --prefix=/opt/udunits2

  - lapack & blas (latest)
  Use your package manager

  - antlr (2.7.7)
  Use your package manager

  - nco (latest)
    FC=ifort F77=ifort CXX=icc CC=icc CPP='icpc -E' CXXCPP='icpc -E' CFLAGS='-Df2cFortran -fPIC'
CPPFLAGS="-I/opt/hdf5/include -I/opt/udunits2/include -I/opt/netcdf/include" LIBS="-L/opt/hdf5/lib64 -L/opt/
udunits2/lib64 -L/opt/netcdf/lib64" NETCDF4_ROOT=/opt/netcdf UDUNITS2_PATH=/opt/udunits2 ./configure
--prefix=/opt/nco

    - cdo (latest)
    FC=ifort F77=ifort CXX=icc CC=icc CPP='icpc -E' CXXCPP='icpc -E' CFLAGS='-Df2cFortran -fPIC'
CPPFLAGS="-I/opt/hdf5/include -I/opt/udunits2/include" LIBS="-L/opt/hdf5/lib64 -L/opt/udunits2/lib64" ./
configure --prefix=/opt/cdo --with-udunits2=/opt/udunits2 --with-hdf5=/opt/hdf5 --with-netcdf=/opt/netcdf
```

위 필수 라이브러리 중 antlr, udunit2 등은 NCO와 CDO의 설치에 사용되지만 최신 버전의 NCO는 위 라이브러리가 없어도 설치가 진행된다. 한편 NCO와 CDO는 모델의 실험에는 사용되지 않으며, 모델 적분이 종료

된 후 후처리 스크립트의 실행 시에만 활용되므로 NCL 등의 다른 라이브러리를 이용하여 결과를 계산하는 경우에는 따로 설치할 필요가 없다. 이 기술노트의 실험 과정에서도 모델에서 제공하는 후처리 코드를 사용하지 않았기 때문에 NCO와 CDO를 설치하지 않았다. 이 연구에서는 /data1/LOVECLIM/LIB13 경로에 각각의 필수 라이브러리를 설치하도록 하였고, 이 연구에서 사용한 라이브러리들의 버전과, 각 라이브러리의 소스 디렉토리에서 실행했던 설정 명령은 다음과 같다.

```
# udunits 1.12.11
env CC=icc CFLAGS='-Df2cFortran -fPIC' PERL= ./configure --prefix=/data1/LOVECLIM/LIB13/udunits

# hdf5 1.8.19
env FC=ifort F77=ifort CXX=icpc CC=icc CPP='icpc -E' CXXCPP='icpc -E' CFLAGS='-Df2cFortran -fPIC' ./
configure --prefix=/data1/LOVECLIM/LIB13/hdf5 --enable-fortran --enable-cxx

# zlib 1.2.9
env FC=ifort F77=ifort CXX=icpc CC=icc CPP='icpc -E' CXXCPP='icpc -E' CFLAGS='-Df2cFortran -fPIC' ./
configure --prefix=/data1/LOVECLIM/LIB13/zlib

#netcdf 4.1.3
env FC=ifort F77=ifort CXX=icpc CC=icc CPP='icpc -E' CXXCPP='icpc -E' CFLAGS='-Df2cFortran -fPIC'
CPPFLAGS="-I/data1/LOVECLIM/LIB13/hdf5/include -I/data1/LOVECLIM/LIB13/zlib/include" LIBS="-L/
data1/LOVECLIM/LIB13/hdf5/lib -L/data1/LOVECLIM/LIB13/zlib/lib" ./configure --prefix=/data1/LOVECLIM/
LIB13/netcdf --enable-netcdf4

# lapack 3.5.0 (make.inc 의 BLASLIB 수정 필요 )
cp INSTALL/make.inc.ifort make.inc
```

이후 TOOOLS/Makefile을 아래와 같이 수정 후 make를 실행한다.

```
COMPILFORTAN  = ifort
COMPILCPP     = icc

NETCDFPATH    = /data1/LOVECLIM/LIB13/netcdf
HDF5PATH      = /data1/LOVECLIM/LIB13/hdf5
LAPACKPATH    = /data1/LOVECLIM/LIB13/lapack

OPTIFLAGSFORTRAN  =  -O2 -W1 -warn all
OPTIFLAGSCPP  =  -O2

FORTANFLAGS     =   -cpp -convert big_endian -assume byterecl -align dcommon -free -Dlinux86
$(OPTIFLAGSFORTRAN)
CPPFLAGS =  $(OPTIFLAGSCPP)

INCS          = -Isrc -I. -I$(NETCDFPATH)/include
LIBSFORTRAN   = -L$(LAPACKPATH)/lib -llapack -lblas -L$(NETCDFPATH)/lib -lnetcdf -lnetcdff
LIBSCPP       = -L$(NETCDFPATH)/lib -lnetcdf_c++ -lnetcdf
```

RUN/V1.3/tools/Makefile을 다음과 같이 수정 후 make를 실행한다.

```
COMPILFORTAN  = ifort
COMPILCPP     = icc

NETCDFPATH    = /data1/LOVECLIM/LIB13/netcdf
HDF5PATH      = /data1/LOVECLIM/LIB13/hdf5

OPTIFLAGSFORTRAN   =  -O2 -W1 -warn all
OPTIFLAGSCPP  =  -O2

FORTANFLAGS      =    -cpp -convert big_endian -assume byterecl -align dcommon -free -Dlinux86
$(OPTIFLAGSFORTRAN)
CPPFLAGS =  $(OPTIFLAGSCPP)

INCS          = -Isrc -I. -I$(NETCDFPATH)/include
LIBSFORTRAN   = -L$(NETCDFPATH)/lib -lnetcdf -lnetcdff
LIBSCPP       = -L$(NETCDFPATH)/lib -lnetcdf_c++ -lnetcdf -lnetcdff
```

RUN/V1.3/tools/atlas/Makefile을 아래와 같이 수정 후 make를 실행한다.

```
export COMPILFORTAN  = ifort
export COMPILCPP     = icc

export NETCDFPATH    = /data1/LOVECLIM/LIB13/netcdf
export HDF5PATH      = /data1/LOVECLIM/LIB13/hdf5

export OPTIFLAGSFORTRAN   =  -O2 -w -zero -vec_report0 -i-dynamic
export OPTIFLAGSCPP  =  -O2

export FORTANFLAGS    =  -cpp -convert big_endian -assume byterecl -align dcommon -extend_source -
Dlinux86  $(OPTIFLAGSFORTRAN)
export CPPFLAGS =  $(OPTIFLAGSCPP)
export INCS          = -Isrc -I. -I$(NETCDFPATH)/include
export LIBSFORTRAN   = -L$(NETCDFPATH)/lib -lnetcdf -lnetcdff
export LIBSCPP       = -L$(NETCDFPATH)/lib -lnetcdf_c++ -lnetcdf -lnetcdff
```

RUN/V1.3/expdir/ref/make.macros을 다음과 같이 수정한다.

```
AR          = ar
ARFLAGS       = -cvr
CC          = icc
CFLAGS        = -O6 -arch host ${EXTRACFLAGS}
CMD         = emic.x
CPP         = icc -E
CPPFLAGS      =  ${EXTRACPPFLAGS}
DEFS          = -DHAVE_CONFIG_H
EGREP         = egrep
F90EXT        = ifort
FC          = ifort
FFLAGS          = -w -zero -vec_report0 -static -O1 -ipo -i4 -r8 -cpp -I./sources -convert big_endian -assume
byterecl -align dcommon -extend_source ${EXTRAFFLAGS}
FMAKEDEPEND    = ${FC} -M ${FFLAGS}
FMODINC       = -I
FOPTSEP       =
GREP          = grep
GZIP          = gzip
LD          = ifort -vec_report0
LDFLAGS       =  ${EXTRALDFLAGS}
LIBS          = ${EXTRALIBS}
MAKE          = make
MAKEFILE      = Makefile
MAKEFLAGS     =
MODEXT        = mod
NETCDFINCLUDE   = -I/data1/LOVECLIM/LIB13/netcdf/include
NETCDFLIB     = -L/data1/LOVECLIM/LIB13/netcdf/lib -lnetcdf -lnetcdff -L/data1/LOVECLIM/LIB13/hdf5/lib -
lhdf5 -lhdf5_hl
SED           = sed
TAR           = tar
TARCFLAGS     = cvLf
TARRFLAGS     = rvLf
UDUNITSINCLUDE  = -I/data1/LOVECLIM/LIB13/udunits/include
UDUNITSLIB     = -L/data1/LOVECLIM/LIB13/udunits/lib -ludunits
```

위 과정이 완료되고 난 후 앞서 소개된 RUN/V1.3/expdir 경로에서의 실험 설정 파일의 수정과 newexp 명령을 통해 실험을 수행할 수 있다. 한편 인텔 컴파일러 2018을 이용하여 설치 및 실험을 수행해본 결과 2013과 동일한 컴파일 옵션으로 2013 버전에 비하여 모델 수행속도가 현저히 낮게 나타났다. 2013 이후 버전의 컴파일러에서는 추가적인 최적화가 필요할 것으로 판단된다.

또한 해양모델 CLIO 경우 본문에서 언급한 것 처럼 일반적인 위경도 격자 시스템이 아닌 두 종의 좌표계를 연결한 독특한 형태의 좌표계를 사용한다. 따라서 실험 결과의 활용을 위해서는 위경도 격자 등 널리 활용되는 형태의 격자 시스템으로의 변환이 필요하다. LOVECLIM에서는 이를 위한 도구를 제공하며, 위 컴파일 과정을 통해 TOOOLS 경로에 생성되는 OceanGridChange 바이너리를 이용하여 해양모델의 결과를 위경도 격자로 변환할 수 있다.