

기술노트: LOVECLIM 1.3의 산업혁명기 이전과 마지막 최대 빙하기 대기 모의 성능 평가

전상윤*, 김성중

*극지연구소 극지기후변화연구부, 인천광역시 연수구 송도미래로 26

Technical Note: Evaluation of LOVECLIM 1.3 for simulating atmosphere during preindustrial and Last Glacial Maximum periods

Sang-Yoon Jun*, Seong-Joong Kim

*Korea Polar Research Institute (KOPRI), Division of Polar Climate Change

요약 : 중간복잡도 지구시스템모델 LOVECLIM 1.3을 이용하여 산업혁명기이전 (Preindustrial; PI)과 마지막최대빙하기 (Last Glacial Maximum; LGM) 기후를 모의하고 이 실험들의 지면온도, 200 hPa 동서방향바람, 800 hPa 남북방향바람을 5차 접합모델상호비교 프로젝트 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5; CMIP5)의 7종 지구시스템모델의 모의 결과와 비교하였다. LOVECLIM은 CMIP5 평균에서 나타나는 PI, LGM 시기의 지면온도의 위도와 대륙/해양별 분포 및 계절별 변화를 잘 모의하는 것으로 나타난다. 200 hPa 동서방향 바람의 경우 지면온도에 비하여 CMIP5의 평균장과의 공간상관도는 낮아지나 주요한 전구 분포와 계절성을 잘 모의하고 있다. 이에 반해 800 hPa 남북방향바람의 모의 결과는 CMIP5 모델간 평균에 대한 공간상관도와 정규화 표준편차 비율 모두 낮게 나타난다. 이러한 PI와 LGM 실험결과로 미루어 판단할 때 LOVECLIM의 지면온도와 200 hPa 동서방향바람은 과거 기후의 연구에서 활용될 수 있을 것으로 보이나 800 hPa 남북방향바람의 해석에는 주의가 필요하다.

주요어: 중간복잡도 지구시스템모델, LOVECLIM, 마지막최대빙하기, CMIP5, PMIP3

Abstract : This study performed two preindustrial (PI) and last glacial maximum (LGM) experiments by using LOVECLIM 1.3, the earth system models of intermediate complexity. Surface temperature, zonal wind at 200 hPa, and meridional wind at 800 hPa from these results are compared to those from long-term climate experiments of pi and lgm in the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 (CMIP5) in order to evaluate a performance of LOVECLIM. In a result, LOVECLIM well simulates surface temperature during both PI and LGM periods in terms of spatial distribution and seasonality compared to CMIP5 modelling result. The spatial distribution and seasonality of zonal wind at 200 hPa in both periods are also well simulated but shows less similarity with CMIP5 result than surface temperature. In contrast, meridional wind at 800 hPa shows weak pattern correlation and low normalized standard deviation ratio against CMIP5 modeling results. This result suggests that surface temperature and zonal wind at 200 hPa from LOVECLIM simulation can be used to examine past climate change, but meridional wind might be interpreted with great caution.

Key words : Earth System Model of Intermediate Complexity, LOVECLIM, Last Glacial Maximum, CMIP5, PMIP3

1. 서론

고기후 모델링은 고기후 프록시 방법과 함께 고기후 연구에 널리 사용되는 방법의 하나이다. 고기후 모델링은 과거 기후 모의를 통해 다양한 물리학적 가설들을 검증하고, 고기후 프록시 자료의 시공간적인 제약, 계절적 편향성에 따라 나타나는 기후인자간 관계의 간극을 메우는 도구로 활용되고 있다.

지구시스템모델 (Earth System Model; ESM), 중간복잡도 지구시스템모델 (Earth system Model of Intermediate Complexity; EMIC), 단순 개념 모델 등의 다양한 모델들이 이러한 고기후 모델링에 활용되고 있다 (Claussen et al., 2002). 지구시스템 모델이 널리 활용되는 현재 기후 변동성 연구와 미래 기후 예측 연구에 비하여, 장기간의 모의가 필요한 고기후 모델링에서는 모의과정을 단순화시킨 중간복잡도 지구시스템모델과 단순 개념모델의 활용도가 높은 편이다. 이러한 중간복잡도 지구시스템모델에서 모의과정 단순화를 위해 선택되는 주요 대상은 기후시스템에서 짧은 주기의 변동성을 갖지만 상대적으로 많은 수치 연산 자원을 필요로 하는 대기 과정이다. 중간복잡도 지구시스템모델간 상호 비교 연구에 참여한 15종의 중간복잡도 지구시스템모델을 살펴보면 대부분 모델이 대기시스템의 모의에 에너지균형모델이나 통계기반 역학모형을 사용하고 있으며, 오직 4종의 모델만이 준지균근사 혹은 정역학근사를 사용한 대기운동방정식에 기반한 3차원 대기 운동의 모의가 가능한 것으로 나타났다 (Eby et al., 2013).

과거 기후에서 대기순환장 변화는 강수량, 몬순 등의 지역 기후시스템에 영향을 미치는 물론 대기-해양간 탄소순환을 통한 온실기체의 변동에도 기여하는 것으로 알려져 있다 (Toggweiler et al., 2006). 따라서 중간복잡도 지구시스템 모델을 이용한 고기후 모델링에서 대기순환장 모의 성능 역시 중요하게 고려되어야 할 요소이다. 5차 접합 모델 상호 비교 프로젝트 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5; CMIP5)에서는 3차 고기후모델링 상호 비교 프로젝트

(Paleoclimate Modelling Intercomparison Project phase 3; PMIP3)에서 제안한 21,000년전의 마지막 최대빙하기 기후와 6,000년전의 홀로세 중기 기후 모의를 TIER 1 장기 모의 실험군으로 설계하였으며 다양한 모델이 이 실험에 참여하였다 (Taylor et al., 2011). 상대적으로 정교한 지구시스템모델의 과거 기후 모의 실험 결과들은 중간복잡도 지구시스템모델의 고기후 모의 성능 평가, 특히 대기순환장 모의 성능 평가에 활용될 수 있다.

따라서 이 연구는 중간복잡도 지구시스템모델을 이용하여 마지막 최대빙하기와 산업혁명기 이전 시기의 모의하고, 이 모의된 대기순환장을 CMIP5의 최신 지구시스템모델들의 결과와 비교하여 중간복잡도 지구시스템모델의 고기후 대기순환장 연구에의 활용가능성을 살펴보려 한다.

2. 모델 실험 및 자료

2.1 중간복잡도 지구시스템모델 LOVECLIM

LOVECLIM은 대기, 해양, 지면식생, 해양탄소순환, 육빙을 모의하는 구성모델을 갖는 중간복잡도 지구시스템모델이다 (Goosse et al., 2010). 3차원 대기운동의 모의가 가능한 중간복잡도 지구시스템모델의 하나로 준지균근사방정식에 근거한 3차원 대기모형 ECBilt (Opsteegh et al., 1998)와 3차원 정역학계 해양모형 CLIO (Goosse and Fichefet, 1999)을 주 구성모델로 가지며, 과거 주요 기후 모의 (Goosse et al., 2010; Nikolova et al., 2013), Heinrich 이벤트 (Menviel et al., 2008; 2011; Chikamoto et al., 2012), 제4기 기후 변동 복원 (Funder et al., 2011; Timmermann et al., 2014; Liu et al., 2014) 등의 다양한 고기후 연구에 활용되고 있다. Table 1에서 이 LOVECLIM의 주요 특징을 간략하게 정리하였다.

2.2 실험 설계

지구시스템모델과의 모의 성능 비교를 위하여 LOVECLIM version 1.3을 이용한 현재와 과거 두 시기의 기후 실험을 수행하였다. LOVECLIM version 1.3은 version 1.2에 비교하여 상대습도에

Table 1. Brief description of modeling components of LOVECLIM

구성모델	특징
대기모델	연직 3층, 수평해상도 5.6°×5.6° 준지구균근사방정식계 모델
해양모델	연직 30층, 수평해상도 3°×3° 정역학 방정식계 모델
해빙모델	연직 3층 열역학방정식계 모델, 2층 해빙두께 과정
지면모델	단층 지중온도 과정, river routing 모델, 지중수분 버킷 모델
생지화학 모델	해양탄소순환모델, 지면탄소순환모델, 역학식생모델
육빙모델	연직 30층, 수평 10km×10km 열역학계 모델

Table 2. Brief description of experimental designs for PI and LGM simulations

	PI	LGM
지구공전 궤도변수	이심율: 0.016724 경사도: 23.446 근일점: 102.04	이심율: 0.018994 경사도: 22.949 근일점: 114.42
온실기체	CO ₂ : 280 ppm CH ₄ : 760 ppb N ₂ O: 270 ppb CFC: 0	CO ₂ : 185 ppm CH ₄ : 350 ppb N ₂ O: 200 ppb CFC: 0
태양상수	1365 Wm ⁻²	PI와 동일
육빙조건	현재기후와 동일	21,000년 이전 육빙 조건 (ICE-6G, MOCA, ANU 자료 평균)
지형조건	현재기후와 동일	단한 Bering Strait, Hudson Bay와 Barents Sea에는 육빙 존재, 덴마크 해협, 지브랄타 해협, 인도네시아 트루플로우는 존재함

기반한 총운량 모의과정 등 개선된 대기모델 물리과정이 포함되어 있다. 수행한 두 기후 실험은 CMIP5 실험군의 산업혁명기이전 (Preindustrial; PI)와 마지막최대빙하기 (Last Glacial Maximum;

LGM)의 기후 평형 실험으로 PI 시기의 실험 조건은 CMIP5의 실험 설정을, LGM 시기의 실험 조건은 PMIP3의 실험 설정을 따른다. 이 주요 실험 설정은 Table 2에 정리되어 있다. 두 실험 모두 5000년간 적분하였으며, LOVECLIM 1.3에서는 해양탄소순환모델과 육빙모델은 공개되어 있지 않아 이 실험에는 대기-해양-해빙-지면-식생 모델을 사용하였다.

2.3 자료 및 방법

LOVECLIM과의 대기순환장 비교를 위하여 CMIP5의 PI (CMIP5 label : piControl)과 LGM (CMIP5 label : lgm) 실험 결과를 사용하였다. PI 실험은 CMIP5의 핵심 (core) 실험군으로 대부분의 참여모델이 수행하는 실험이나, LGM 실험의 경우 TIER 1 실험군으로 일부 모델만이 선택적으로 참여하였다 (Taylor et al., 2011). 실험 결과의 비교를 위해서 두 실험군에 모두 참여한 7종의 모델 결과를 사용하였으며, 이 7종의 모델의 종류와 특징은 Table 3에 정리하였다.

LOVECLIM 실험의 지면온도 (surface temperature), 800 hPa 남북방향바람 (meridional wind), 200 hPa 동서방향바람 (zonal wind)의 계절별 평균장 및 표준편차를 CMIP5 7종의 모델간 평균값과 비교하여 LOVECLIM의 모의 특성을 살펴보았다. 비교를 위해 CMIP5의 자료를 LOVECLIM 대기모델의 해상도인 약 5.6도의 수평해상도로 변환하였다. 또한 CMIP5 모델간 평균장을 이용한 테일러 다이어그램 (Taylor, 2001)을 통하여 CMIP5 모델들과 LOVECLIM간의 정량

Table 3. CMIP5/PMIP3 models used in this study

모델명	국가	대기 해상도
CCSM4	미국	0.9424°×1.25°
CNRM-CM5	프랑스	1.4008°×1.40625°
FGOALS-g2	중국	2.7906°×2.8125°
IPSL-CM5A-LR	프랑스	1.8947°×3.75°
MIROC-ESM	일본	2.7906°×2.8125°
MPI-ESM-P	독일	1.8653°×1.875°
MRI-CGCM3	일본	1.12148°×1.125°

기술노트: LOVECLIM 1.3의 산업혁명기 이전과 마지막 최대 빙하기 대기 모의 성능 평가

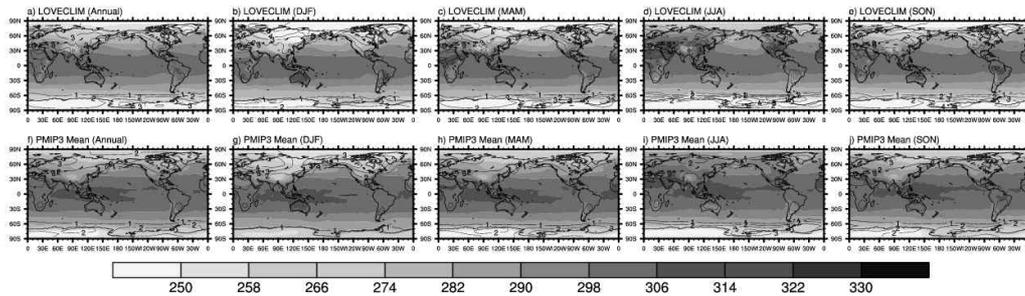


Fig. 1. annual, DJF, MAM, JJA, and SON mean surface temperature (shade) and standard deviation (contour) from PI experiment by LOVECLIM (top) and average of piControl experiments by 7 CMIP5 models (bottom).

화된 모의 편차를 살펴보았다.

3. 결과 및 토의

3.1 PI 실험의 모의 특성

LOVECLIM의 PI 시기 지면온도 모의 결과를 살펴보면 전체적으로 지면온도의 위도별 분포와 대륙/해양별 분포와 이러한 분포의 계절별 변화를 잘 모의하고 있는 것으로 나타난다 (Fig. 1). 한편 CMIP5의 모의 평균과 비교하였을 때는 전 계절, 전지역에 걸쳐 전체적으로 낮은 지면온도를 보인다. 특히 CMIP5 모의 평균의 인도양-서태평양 지역의 온난한 해수면온도 지역은 LOVECLIM 결과에서는 나타나지 않으며, 북극지역의 온도는 전 계절, 특히 북반구 여름과 가을에 더 낮게 나타나고 있다. 지면온도의 변동성을 살펴보면 CMIP5의 평균 변동성 모의 결과와 유사하게 고위도와 대륙에서의 높은 변동성이 잘 나타나고 있다.

이러한 LOVECLIM의 지면온도 모의성능은 테

일러 다이어그램에서도 확인할 수 있다. Figure 2의 지면온도의 연평균 및 계절별 분포의 테일러 다이어그램을 살펴보면 CMIP5의 평균과의 공간상관도로 나타나는 공간모의 특성은 모두 0.98-0.99 정도로 다른 CMIP5 모델들의 공간상관도와 비교하였을 때 거의 유사하게 나타난다. 한편 공간분포의 표준편차의 비율로 표현되는 정규화 표준편차 비율은 다른 CMIP5 모델들에 비교하였을 때 공간상관도에 비하여 차이가 크게 나타나는데 이는 LOVECLIM의 모의 결과에서 나타나는 CMIP5 평균에 비하여 낮은 북극지역 온도에 기인하는 것으로 보이며, 표준편차의 비가 북반구 여름과 가을에서 높게 나타나는 것이 이를 반증한다.

LOVECLIM 대기모델의 최상층인 200 hPa의 동서방향 바람의 모의 결과를 살펴보면 30-60°N 중위도 지역에서 나타나는 최대 강풍 지역이 잘 모의되고 있으며 각 반구의 겨울철에 강한 제트류가 나타나는 등 계절 변화 역시 잘 모의되고 있다 (Fig. 3). 이를 볼 때 LOVECLIM은 CMIP5 모

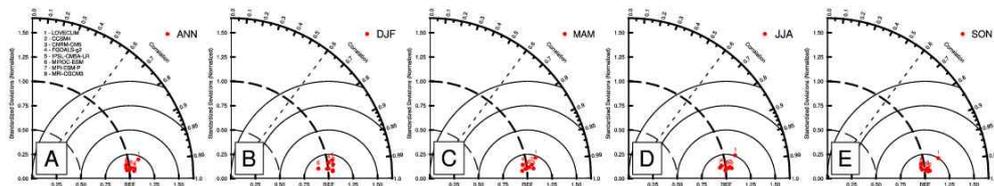


Fig. 2. taylor diagram for surface temperature from PI experiment of LOVECLIM and piControl experiments of 7 CMIP5 models. Reference value is the ensemble mean value from 7 CMIP5 models.

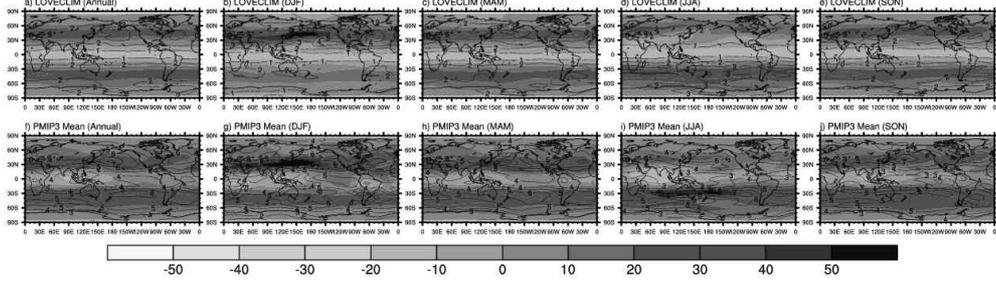


Fig. 3. same as Fig. 1 except for 200 hPa zonal wind.

델들의 200 hPa 동서방향 바람의 평균 공간분포 및 계절별 변화를 잘 모의하고 있는 것으로 보인다. 특히 북반구 겨울철 중위도 동아시아에서 북서태평양에 걸쳐 나타나는 강한 제트 지역이 잘 모의되고 있는 등 (Figs. 3b와 3g), 200 hPa의 바람 세기 분포는 CMIP5와 유사하게 나타난다. 이에

성의 경우 LOVECLIM에서 역시 잘 모의되고 있으나 그 강도는 CMIP5에 비하여 매우 낮게 나타난다. 이러한 상대적으로 낮은 LOVECLIM의 변동성은 전 계절에 걸쳐 나타나며, 이는 낮은 연직 해상도와 단순화된 대기 과정이 원인으로 추정된다. 또한 LOVECLIM의 남반구의 모의 결과를 살

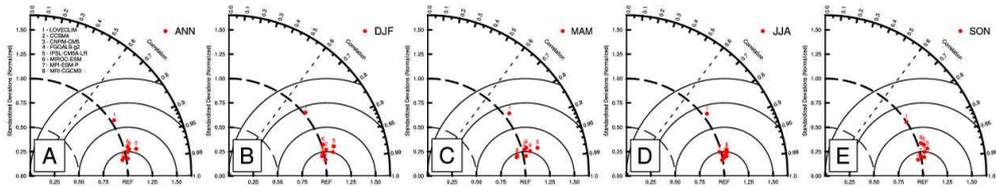


Fig. 4. same as Fig. 2 except for 200 hPa zonal wind.

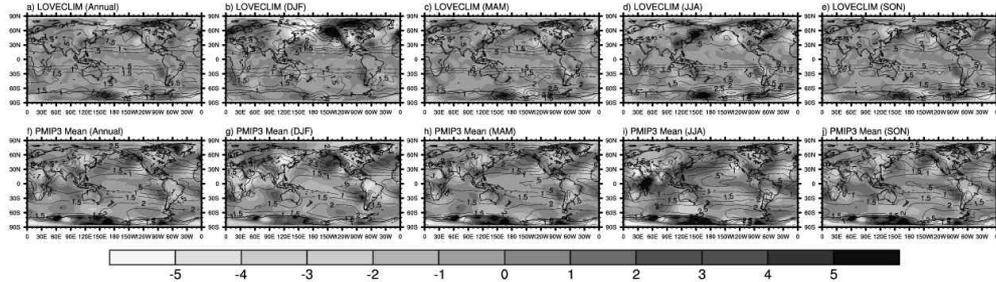


Fig. 5. same as Fig. 1 except for 800 hPa meridional wind.

반해 CMIP5 모의 결과에서 남반구 겨울의 인도양 남서태평양의 강한 서풍지역은 LOVECLIM의 모의 결과에서는 잘 나타나지 않으며 위도에 따라 동서방향으로 거의 균일한 분포를 보인다 (Figs. 3d와 3i).

CMIP5에서 나타나는 각 반구 겨울의 큰 변동

퍼보면 여름을 제외한 다른 계절에서는 경도별 동서방향의 분포 차이가 거의 나타나지 않는다.

200 hPa 동서방향바람의 테일러 다이어그램은 이러한 LOVECLIM의 모의 특성을 잘 나타내고 있다 (Fig. 4). 동서방향바람의 공간상관도는 0.8-0.9 정도이며 0.95-0.99 사이의 공간상관도를

보이는 다른 CMIP5 모델들에 비하여 낮은 값을 보인다. 이 결과는 지면온도와 비교하였을 때도 낮은 수치이다. 한편 200 hPa 동서방향바람 정규화된 표준편차 비율의 경우 전 계절에서 CMIP5와 비슷한 값을 보인다.

800 hPa 하층대기의 남북방향바람의 경우 지면온도와 200 hPa 동서방향 바람과는 달리 위도 및 경도별 비대칭성이 강하게 나타난다 (Fig. 5). 또한 지면온도 분포의 비대칭성의 경우 대륙 분포의 영향과 연관되어 있는 것에 비하여, 800 hPa 남북방향 바람의 경우 연안지역을 제외하면 이러한 대륙 분포의 영향이 상대적으로 작은 것으로 보인다. 이는

지면온도와 달리 남북방향바람장의 CMIP5의 평균장과 비교하였을 때 지역적 분포가 크게 차이나는 것에서도 확인할 수 있다. CMIP5와 비교하였을 때 아프리카 동안 지역을 제외한 태평양과 대서양 연안의 강한 몬순 지역에서의 북풍의 계절적 변화는 모의되고 있지만 이러한 몬순 지역 역시 지역적으로 약간 편향되어 나타나며 특히 해양에서의 남북바람의 분포는 CMIP5와 큰 차이를 보인다. 이는 하층바람의 변화에 기여하는 대류과정, 지면과정, 지면경계층 과정 등의 여러 물리과정들이 LOVECLIM에서 생략되거나 단순화된 것에 영향을 받은 것으로 추정된다. 한편 800 hPa 남북방향바

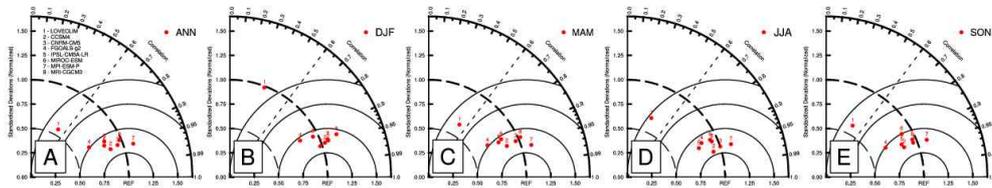


Fig. 6. same as Fig. 2 except for 800 hPa meridional wind.

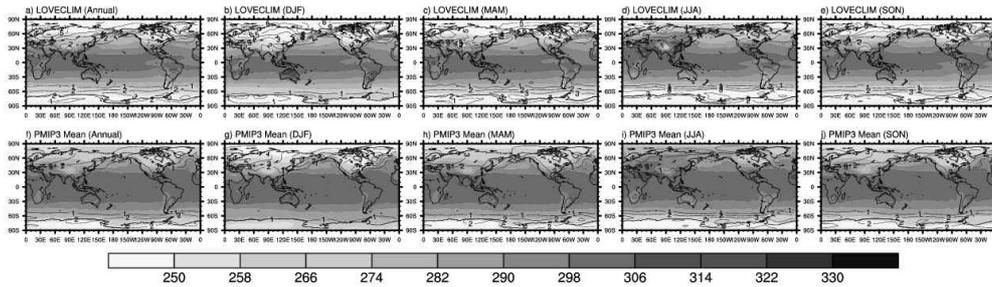


Fig. 7. annual, DJF, MAM, JJA, and SON mean surface temperature (shade) and standard deviation (contour) from LGM experiment by LOVECLIM (top) and average of lgm experiments by 7 CMIP5 models (bottom).

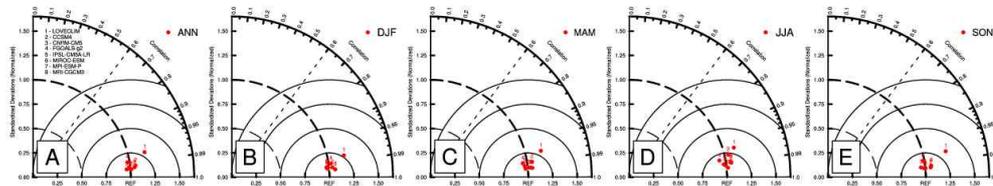


Fig. 8. taylor diagram for surface temperature from LGM experiment of LOVECLIM and lgm experiments of 7 CMIP5 models. Reference value is the ensemble mean value from 7 CMIP5 models.

람의 적도 지역의 변동성의 경우 동서방향으로 균등한 분포를 보이며 고위도로 갈수록 변동성이 커지는 CMIP5의 결과와 유사하게 나타난다.

이러한 800 hPa 남북방향바람의 모의 특성 역시 테일러 다이어그램에서도 확인된다. Figure 6의 800 hPa 남북방향바람의 테일러 다이어그램을 살펴보면 LOVECLIM의 연평균과 계절별 공간상관도는 모두 0.6 이하로, CMIP5 모델들의 0.9 정

는 전 계절에서 동일하게 나타난다 (Fig. 7). 한편 CMIP5의 경우 LGM 시기에 인도양-서태평양의 지역에서 큰 온도 감소 경향이 나타난다. 또한 PI 실험에서 LOVECLIM과 CMIP5간의 차이와 마찬가지로 LOVECLIM이 온도를 전 지역에서 낮게 모의하는 경향을 보인다. 지면온도의 변동성의 경우 대륙지역에서 크고 해양에서 작게 나타나는 지면온도의 변동성을 잘 모의하고 있으며,

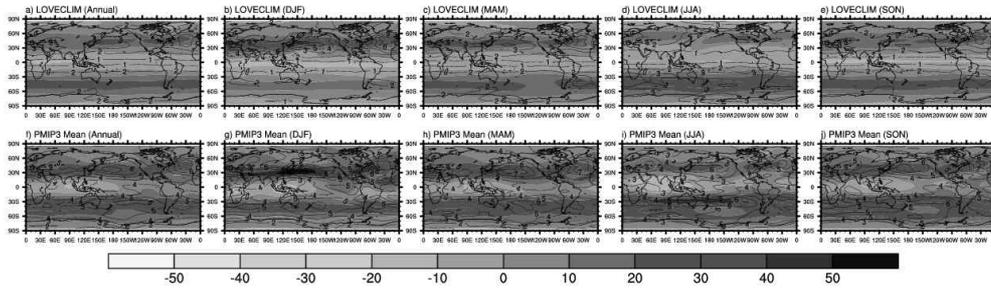


Fig. 9. same as Fig. 7 except for 200 hPa zonal wind.

도의 공간상관도에 비하여 매우 낮게 나타나고 있다. 공간 표준편차 비율 역시 0.5 정도로 다른 변수에 비하여 매우 낮게 나타난다. 하지만 CMIP5의 모델들의 공간상관도와 공간표준편차 역시 지면온도나 200 hPa 동서방향바람에 비하여 넓은 구간에서 분포하고 있다. 즉 800 hPa 남북방향바람의 경우 모델간 모의 편차가 크게 나타나는 불확실성이 큰 변수의 하나이며, 물리과정 등 각 모델의 고유한 특성에 크게 의존하는 변수이다. LOVECLIM의 800 hPa 남북방향바람의 상대적으로 부정확한 모의 결과는 남북방향바람의 대기모델에서의 모델간 큰 편차를 보이는 특성과 중간복잡도 지구시스템모델의 낮은 해상도가 함께 반영된 결과로 판단된다.

3.2 LGM 실험의 모의 특성

LOVECLIM의 LGM 시기의 지면온도 모의결과를 PI 시기의 지면온도 모의결과와 비교하여 살펴보면, 적도 및 고위도 지역 등 전지역의 온도가 감소하며 특히 북반구 고위도 및 북극지역에서의 온도 감소 경향이 더 크게 나타나며 이러한 차이

LOVECLIM의 변동성이 CMIP5에 비하여 더 크게 나타났던 PI 실험과 마찬가지로 LGM 실험에서 역시 LOVECLIM의 변동성이 CMIP5에 비하여 더 크게 나타난다.

이러한 CMIP5에 대한 LOVECLIM의 모의 특성은 테일러 다이어그램에서도 확인된다. Figure 8에서 LGM 시기의 지면온도의 테일러 다이어그램을 살펴보면 Fig. 2와 거의 같은 분포 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. LOVECLIM의 CMIP5 평균장에 대한 공간상관도는 약 0.97-0.99이며, 공간 표준편차의 비는 PI에 비하여 약간 증가하였지만 대체적으로 1.25-1.30 정도로 PI와 비슷하게 나타난다. 이러한 공간 표준편차 비율의 증가는 LOVECLIM이 LGM 시기의 북극지역에서의 큰 온도감소 경향에 기인하는 것으로 보인다. 한편 CMIP5 모델들의 분포는 PI와 마찬가지로 모든 모델이 0.98이상의 공간상관도와 1.0 근처의 정규화 표준편차에 밀집되어 있는 분포를 보인다.

LOVECLIM의 LGM 시기 200 hPa의 동서방향바람의 경우 각 반구의 중위도 지역과 겨울철에 강해지는 동서방향바람의 기본적인 특성이 잘 나

기술노트: LOVECLIM 1.3의 산업혁명기 이전과 마지막 최대 빙하기 대기 모의 성능 평가

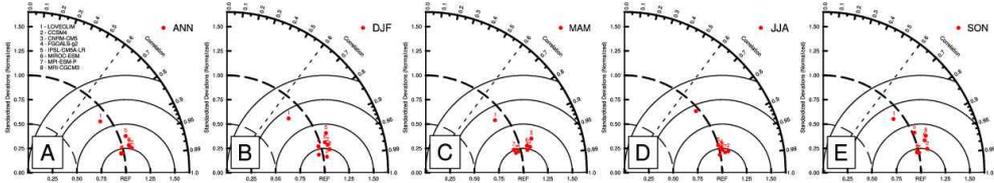


Fig. 10. same as Fig. 8 except for 200 hPa zonal wind.

타나고 있다 (Fig. 9). 한편 PI 시기와 비교하였을 때 북반구 중위도의 강한 바람 지역이 뚜렷하게 감소하는데 이러한 감소 경향은 북반구 여름철을 제외한 모든 계절, 특히 북반구 겨울철에 강하게 나타난다. 동서방향바람의 변동성을 살펴보면 Fig. 3의 PI 실험 결과와 마찬가지로 바람이 강한

타나지 않는 저위도 지역에서도 CMIP5는 큰 변동성을 보인다.

이러한 LGM 시기 200 hPa 동서방향바람의 모의 경향은 테일러 다이어그램에서 확인할 수 있다 (Fig. 10). PI 시기 모의 결과에서 1 근처를 유지하던 정규화 표준편차 비율이 겨울, 봄에 걸쳐

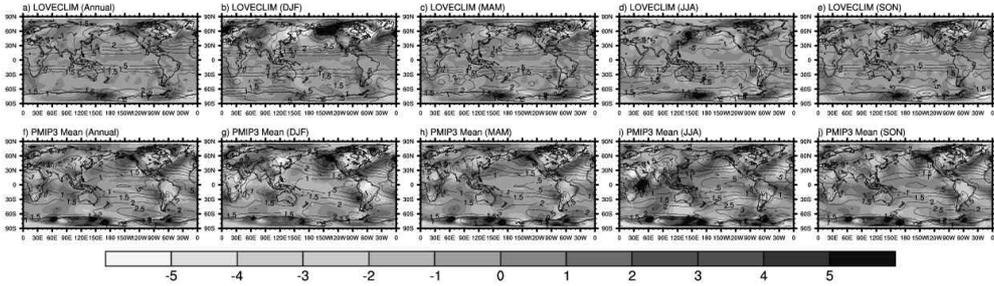


Fig. 11. same as Fig. 7 except for 800 hPa meridional wind.

지역에서의 변동성이 크게 나타난다. 한편 CMIP5 평균 동서방향 바람장의 경우 LOVECLIM에 비해 전지역에서 더 강하게 나타나며 이러한 분포는 PI 시기와 유사하다. 또한 동서방향바람의 변동성 역시 LOVECLIM에 비하여 크게 나타나며 특히 LOVECLIM 결과에서 변동성이 거의 나

감소하는 것으로 나타나고 있다. 이에 반해 PI 실험 결과의 CMIP5 모델들의 테일러 다이어그램의 분포는 LGM 시기에도 거의 유사하게 나타나고 있다.

LGM 시기의 800 hPa 남북방향 바람의 경우 PI 실험에서 나타났던 위도 및 경도별 비대칭성이

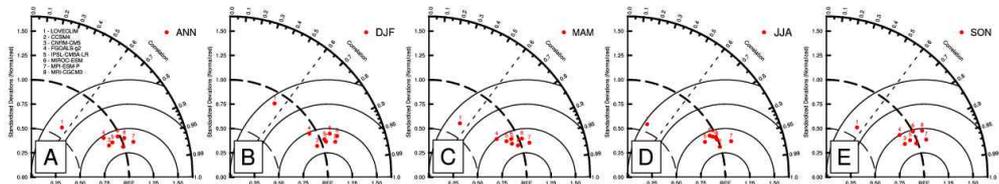


Fig. 12. same as Fig. 8 except for 800 hPa meridional wind.

나타난다 (Fig. 11). PI 실험에서와 마찬가지로 CMIP5에서 나타나는 몬순중 동아프리카 몬순은 LOVECLIM에서 거의 모의되지 않고 있다. 한편 변동성의 경우 LOVECLIM의 PI 실험에서의 적도에서의 강한 동서방향 균일성이 LGM 실험에서 마찬가지로 나타나며 상대적으로 동서방향 균일성이 약하고 변동성의 지역 차이가 더 크게 나타나는 CMIP5의 모의 특성은 LGM 실험에서도 마찬가지로 나타나고 있다. 또한 CMIP5의 LGM 시기의 고위도 몬순지역의 800 hPa 남북방향바람의 세기는 PI 시기에 비해 더 강해지는 것으로 나타난다.

이와 같이 상대적으로 모델간의 편차가 큰 800 hPa 남북방향바람의 특성은 LGM 시기에도 마찬가지로 나타나며, 800 hPa 남북방향바람의 테일러 다이어그램은 이러한 특성을 잘 보여주고 있다 (Fig. 12). PI 시기의 테일러 다이어그램에서 나타났던 바와 같이 LGM 시기에서도 CMIP5 평균장에 대한 LOVECLIM의 모의정확도는 상대적으로 매우 낮게 나타나며, CMIP5 모델들의 모의정확도 분포 또한 상대적으로 넓은 지역에 분포하고 있다.

3.3 LGM 실험과 PI 실험의 차이

LOVECLIM과 CMIP5 모델들이 모의하는 PI 시기에 대한 LGM 시기의 연평균, 겨울철과 여름철 평균 지면온도의 변화를 Fig. 13에서 살펴보았다. 앞서 LGM 시기의 평균 지면온도의 분포에서 살펴본 바와 같이 CMIP5 평균장의 경우 북반구의 온도 감소의 폭이 남반구에 비하여 크며, 이러한 온도의 감소는 각 반구의 겨울철에 크게 나타난다. LOVECLIM의 경우 겨울철 온도감소 폭이 CMIP5에 비하여 크며, 특히 북반구 육빙지역의 온도 감소는 약 -50도 정도로 매우 크게 나타난다. 또한 북극해 지역 역시 CMIP5 평균과 다른 CMIP5 모델들에 비하여 매우 강한 온도 감소가 나타난다.

CMIP5 모델들의 경우 북반구의 육빙지역의 강한 온도 감소 경향은 전 계절에 걸쳐 동일하게 나타나지만, 다른 지역의 감소 경향은 모델마다 다르게 나타난다. 특히 남극대륙 지역의 경우

CNRM-CM5은 여름철에 오히려 온난화 경향을 보이며, FGOALS-g2와 MIROC-ESM의 경우 감소 경향이 여름과 겨울의 계절적 차이를 보이지 않는다.

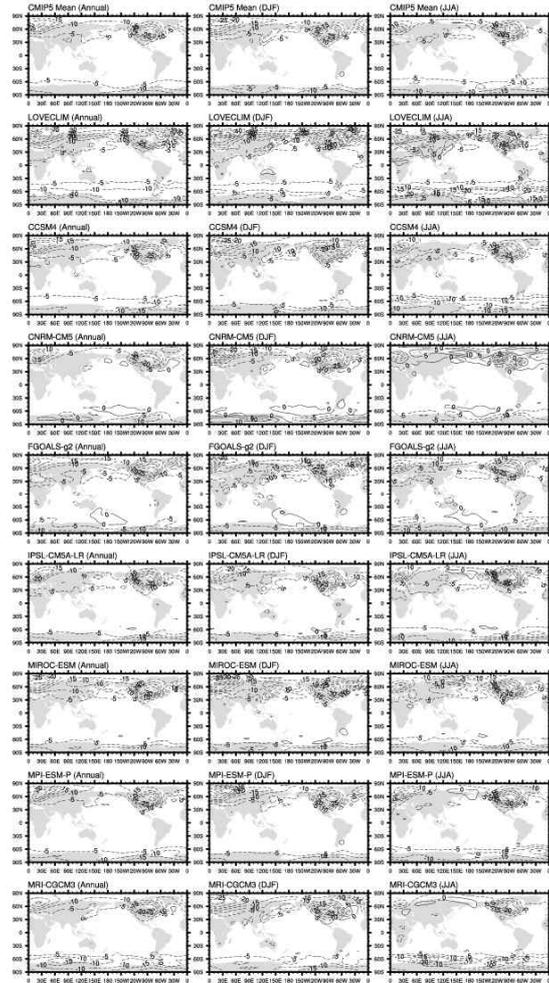


Fig. 13. difference of surface temperature between LGM and PI experiments from LOVECLIM and CMIP5

북반구 겨울철 200 hPa 동서방향바람의 경우 LGM 시기의 CMIP5의 평균장은 중위도 지역 동아시아와 북서아메리카지역에 걸쳐 풍속이 감소하고 해당지역의 남쪽에서 풍속이 강화하는 제트기류의 남하 경향을 보인다. 이러한 북반구 제트

기류의 남하 경향은 대부분의 CMIP5 모형에서

트기류가 남하하는 경향을 보이지만 다른 모델들에서는 이러한 경향이 잘 나타나지 않는다.

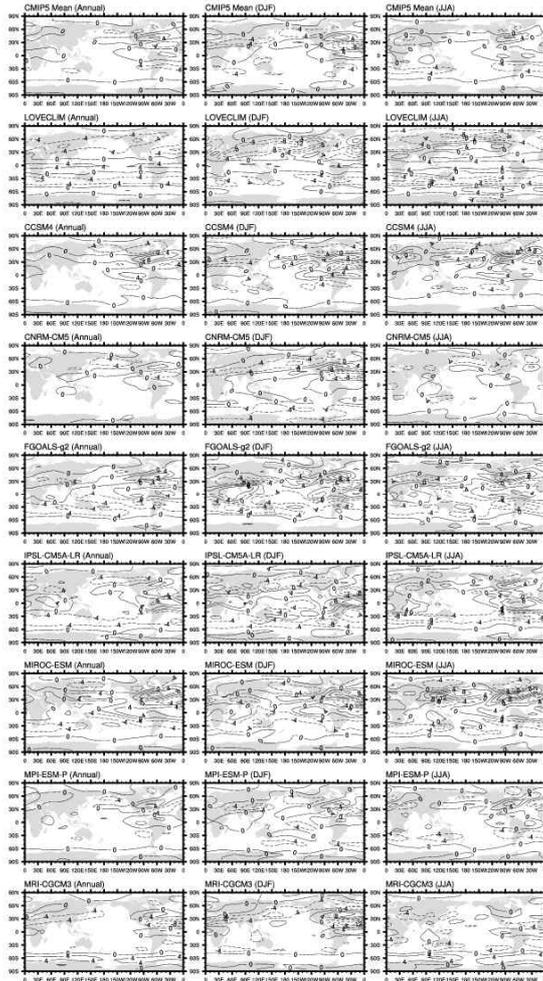


Fig. 14. same as Fig. 13 except for 200 hPa zonal wind

나타난다. 한편 LOVECLIM은 중위도 지역의 풍속 감소 경향을 더 강하게 모의하지만 제트기류의 뚜렷한 남하 경향은 나타나지 않는 것으로 보

인다. 이에 비하여 남반구 겨울철 제트기류의 경우, CMIP5 평균장에서 풍속의 약화는 나타나지만 이동 경향은 나타나지 않는 것으로 보인다. 각 모델들에서도 CCSM4와 MRI-CGCM3의 경우 제

4. 결론

이 연구에서는 LOVECLIM을 이용하여 PI와 LGM 시기의 기후를 모의하고 이 모의 결과를 CMIP5의 piControl, lgm 실험에 참여한 7종의 모델 결과와 비교하였다. 비교 결과 LOVECLIM은 PI, LGM 시기의 지면온도의 위도와 대륙/해양별 분포 및 계절별 변화를 잘 모의하는 것으로 나타났다. CMIP5의 지구시스템모델의 평균과 비교하였을 때 지면온도 모의 결과의 공간상관도와 정규화 표준편차 역시 전 계절에 걸쳐 높게 나타나며, 테일러 다이어그램에서 다른 지구시스템모델들과 비슷한 분포를 보인다. 200 hPa 동서방향 바람의 경우 지면온도에 비하여 CMIP5의 평균장과의 공간상관도는 낮아지나, 두 실험에서 모두 0.7 이상의 공간상관도를 보인다. CMIP5의 다른 모형들과 비교하였을 때 공간상관도는 상대적으로 낮은 편이나 정규화 표준편차 비율의 경우 좋은 결과를 보이며 특히 PI 실험의 경우 1 근처의 값을 보인다. 800 hPa 남북방향바람의 경우 지면온도와 200 hPa 동서방향바람에 비하여 공간상관도와 정규화 표준편차가 모두 낮게 나타난다. CMIP5 모형들의 공간상관도와 정규화 표준편차 비율 역시 지면온도와 동서방향바람에 비하여 낮고 다양한 값을 보이지만 LOVECLIM의 경우 CMIP5의 다른 모형들에 비교하여도 낮은 모의 정확도를 보인다. CMIP5 모형과 유사한 모의 결과를 보이는 지면온도와 200 hPa 동서방향 바람장의 LGM과 PI 시기의 차이를 살펴본 결과 CMIP5 평균장에서 모의되는 주요 변화들을 LOVECLIM에서도 모의되는 것으로 나타난다. 이러한 PI와 LGM 실험결과로 미루어 판단할 때 LOVECLIM의 지면온도와 200 hPa 동서방향바람은 과거 기후의 연구에 활용될 수 있을 것으로 생각되지만 800 hPa 남북방향바람의 경우 활용에 큰 주의가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 극지연구소 “과거, 현재의 극지기후 관측과 재현을 통한 기후변화 메커니즘 규명 (PE16010)” 과제의 지원으로 수행되었습니다. 비교 분석을 위한 CMIP5 자료를 제공해 주신 서울대학교 최정 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- Chikamoto, M. O., L. Menviel, A. Abe-Ouchi, R. Ohgaito, A. Timmermann, Y. Okazaki, 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. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, 61, 114–126
- Claussen, M., and Coauthors, 2002: Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models. *Clim. Dyn.*, 18, 579–586
- Eby, M., Weaver, A. J., Alexander, K., Zickfeld, K., Abe-Ouchi, A., Cimadoribus, A. A., ...Zhao, F. (2013). Historical and idealized climate model experiments: an intercomparison of Earth system models of intermediate complexity. *Climate of the Past*, 9(3), 1111–1140
- Funder, S., and Coauthors, 2011: A 10,000-Year Record of Arctic Ocean Sea-Ice Variability—View from the Beach. *Science*, 333, 747–750
- Goosse, H., and Coauthors, 2010: Description of the Earth system model of intermediate complexity LOVECLIM version 1.2. *Geosci. Model Dev.*, 3, 603–633
- Goosse, H., and T. Fichefet, 1999: Importance of ice-ocean interactions for the global ocean circulation: A model study. *J. Geophys. Res. Ocean.*, 104, 23337–23355
- Liu, Z., and Coauthors, 2014: The Holocene temperature conundrum. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 111, E3501–E3505
- Menviel, L., A. Timmermann, A. Mouchet, and O. Timm, 2008: Meridional reorganizations of marine and terrestrial productivity during Heinrich events. *Paleoceanography*, 23.
- 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
- Opsteegh, J., R. Haarsma, F. Selten, and A. Kattenberg, 2011: ECBILT: a dynamic alternative to mixed boundary conditions in ocean models. *Tellus A*, 50.
- Taylor, K. E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 106, 7183–7192
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 485–498
- 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. Clim.*, 27, 1863–1875
- Toggweiler, J. R., J. L. Russell, and S. R. Carson, 2006: Midlatitude westerlies, atmospheric CO₂, and climate change during the ice ages. *Paleoceanography*, 21



THE KOREAN JOURNAL OF QUATERNARY RESEARCH

第 四 紀 學 會 誌



第四紀學會誌

Volume 30 Number 2 (Series No. 47)

第 30 卷 第 2 號(通卷 第 47 號)

Articles

목 차

Climate Response to a Change in Sea Surface Temperature for the Last Glacial Maximum
Seong-Joong Kim, Seung-II Nam 1

Sedimentary and paleoenvironmental changes related to sea level fluctuations from the northern East China Sea during the MIS 3
S.I. Nam, Y.J. Son, S.P. Kim, D.G. Yoo, J.H. Chang, S.W. Chang, Andreas Mackensen 6

Pollen and phytolith assemblage characteristics from the excavation 2-3 site (Songjeol-dong) of Technopolis Industrial Complex I area, Cheongju, Korea: preliminary results with emphasis on agricultural cultivation
Sangheon Yi, Keun-Chang Oh, Ju-Yong Kim, Seungwon Lee, Byeongil Yun, Eunmi Lee, Yongmi Kim 18

Technical Note: Evaluation of LOVECLIM 1,3 for simulating atmosphere during preindustrial and Last Glacial Maximum periods
Sang-Yoon Jun, Seong-Joong Kim 33

마지막 최대 빙하기의 표층수온변화에 따른 기후변화 수치실험 연구
김성중, 남승일 1

후기 제 4기 MIS 3 해수면 변동에 따른 북부 동중국해의 퇴적환경변화
남승일, 손영주, 김성필, 유동근, 장정해, 장세원, 안드레아스 막켄센 6

청주 테크노폴리스 일반산업단지 내 I 지구 2-3지점 유적(송절동)에서 산출된 화분과 식물규소체의 특성: 농경활동의 가능성에 대한 예비결과
이상현, 오근창, 김주용, 이승원, 윤병일, 이은미, 김용미 18

기술노트: LOVECLIM 1,3의 산업혁명기 이전과 마지막 최대 빙하기 대기 모의 성능 평가
전상윤, 김성중 33

December 2016

The Korean Quaternary Association (KOQUA)

2016年 12月

韓國 第四紀學會

THE KOREAN JOURNAL OF QUATERNARY RESEARCH

Vol. 30. No. 2

December 2016

한국 제4기학회 임원

회 장	양동윤 (한국지질자원연구원)
부회장	남욱현 (한국지질자원연구원) 김성중 (극지연구원) 김종연 (충북대학교) 유동근 (한국지질자원연구원) 조태섭 (연세대학교)
총무이사	임재수 (한국지질자원연구원)
총무간사	한 민 (서울대학교)

편집위원회

위 원 장	남욱현 (한국지질자원연구원)
간 사	한 민 (서울대학교)
고 고 학	편집이사 : 조태섭 (연세대학교) 편집위원 : 이현중 (목포대학교) 이형우 (전북대학교) 박준범 (한강문화재연구원)
고 기 후 학	편집이사 : 김성중 (극지연구소) 편집위원 : 현상민 (한국해양연구원) 임재수 (한국지질자원연구원) 최영은 (건국대학교)
제4기지질학	편집이사 : 임현수 (부산대학교) 편집위원 : 류춘길 (한국지질환경연구소) 이재일 (극지연구소) 이상현 (한국지질자원연구원)
지 형 학	편집이사 : 김종연 (충북대학교) 편집위원 : 박정재 (서울대학교) 박지훈 (공주대학교) 이광률 (경북대학교)
해 양 학	편집이사 : 유동근 (한국지질자원연구원) 편집위원 : 김부근 (부산대학교) 남승일 (극지연구소) 이경은 (한국해양대학교)

제4기학회지 제30권 제2호 통권 47호

발행인 한국제4기학회 회장 양동윤
편집인 한국제4기학회 편집위원장 남욱현
인쇄일 2016년 12월 28일
발행일 2016년 12월 31일
인쇄처 오비기획 (042-823-5239)

학회 주소 : 34121 대전광역시 유성구 대덕대로 566 2층
Tel : 042-868-3031 / Email : hanmin@kigam.re.kr

제4기학회지 투고규정 (Authors Guideline)

제 1 조 (목적)

이 규정은 '사단법인 한국제4기학회' (이하 "본 학회"라 한다)에서 발행하는 '제4기학회지 (The Korean Journal of Quaternary Research)' (이하 '본 학회지'라 한다)의 학술논문과 총설 등의 투고에 관한 절차 및 제반 사항을 규정함을 목적으로 한다.

제 2 조 (투고자의 자격)

논문의 투고자는 저자 중 1인이 본 학회의 회원이어야 한다. 투고하는 논문은 다른 학술지에 발표되지 않은 내용이어야 하며, 제4기와 관련된 전 분야 (고고학 / 고기후학 / 제4기 지질학 / 지형학 / 해양학 등)의 학술성과를 대상으로 한다.

제 3 조 (원고의 접수)

논문의 원고는 본 학회 웹사이트의 투고시스템을 이용하여 제출함을 원칙으로 한다. 다만, 학회 사무국에 우편으로 발송하는 경우는 인쇄물 4분을 투고 양식에 맞추어 제출한다.

제 4 조 (원고의 종류)

학회지에 게재한 원고는 제4기에 관계된 내용으로 연구논문 (Research Paper), 총설 (Review Paper), 기술노트 (Technical Note), 논평과 회신 (Discussion and Reply) 등으로 하며 투고 이전에 다른 학술잡지 및 기타 출판물에 미발표된 것이어야 한다.

- 연구논문: 제4기 분야 독창적 연구를 수행한 내용으로 학술적인 가치가 있는 내용이 반드시 포함되어야 한다.
- 총설: 제4기 분야의 연구현황, 경향 및 문제점 등에 관한 문헌고찰을 포함하며 독창적인 해석을 통해 학술적으로 가치가 있는 결론을 제시해야 한다.
- 기술노트: 제4기 분야와 관련된 기술적인 자료로서 실용적이며 독창적인 내용을 포함하여야 한다.
- 논평과 회신: 본 학회지에 발표한 연구논문 및 기술자료에 관한 비평을 말하며 연구방법, 논리상의 문제점, 의문점, 건의 등이 포함된다. 제출된 논평은 해당 논문 저자에게 전달하여 가능한 회신하도록 한다.

제 5 조 (원고의 작성 방법)

- 논문의 언어는 국·영문 혼합이며 국문으로 작성 시는 요약을 영문으로 작성하고 영문 저자명을 추가한다.
- 논문의 분량은 최종인쇄 시 그림, 표 등을 포함하여 8쪽 이내로 하며, 초과 분량과 특수 제작에 대해서는 제6조에 규정된 게재료를 추가로 지불한다.
- 논문의 기본형식은 워드프로세서 (아래 한글 또는 MS word)으로 작성된 파일을 원칙으로 한다. 심사용 원고는 A4 용지에 10호 신명조체 작성을 원칙으로 상하, 좌우 3cm의 여백을 두고 줄의 간격은 double-space로 작성한다.
- 논문의 구성은 제목, 저자명, 요약 및 주요어 (Abstract 및 keywords), 본문, 사사 (필요 시), 참고문헌 (References), 기호 (필요 시), 부록 (필요 시) 등과 같은 순서로 하는 것을 원칙으로 한다.
- 논문 제목은 전체 논문이 국문일 경우 국문 제목을 우선하여 작성하고 영문 제목이 다음 줄에 위치하도록 한다. 먼저 오는 논문 제목의 크기는 15로 하고, 나중에 오는 논문 제목의 크기는 12로 하고 가운데 정렬을 기준으로 한다. 영문 제목은 전치사와 접속사를 제외한 각 단어의 첫 글자는 대문자로 한다.
- 저자의 이름이 국문이면 국문 저자명 다음 줄에 영문 저자명이 오도록 하고, 영문이면 성이 먼저 나오도록 한다. 교신저자의 경우 각주에 영문과 국문으로 근무처, 주소 및 이메일 주소를 작성하고, 교신저자를 제외한 공동저자의 경우 근무처만을 국문과 영문으로 표기한다.
- 국문초록은 600자 이내, 영문초록은 400 단어 이내의 분량으로 본문 앞에 쓰며, 논문의 주요 내용을 구체적으로 알 수 있는 동시에 본문과 분리하여도 의미가 통하여야 한다. keyword는 영문초록 아래 오도록 한다.
- 본문에 모든 표 (Table)와 그림 (Figure)가 포함되어야 한다. 본문은 저자의 재량에 따라 구성하되 일관성을 유지하도록 한다.
- 그림과 표는 모두 영문으로 처리하고 그림의 경우 Fig.을 사용하고 표는 Table을 사용한다. 그림의 경우 캡션의 위치는 중앙 하단에 표의 경우 좌측 상단에 위치하도록 한다. 같은 위치에 두 개 또는 그 이상의 그림과 표를 위치시키거나 비교가 필요한 경우는 반드시 (a), (b) 등을 이용한다.
- 수식은 행을 나누어 정리하고, 각 수식의 번호는 (1), (2), (3), ...로 표기하고 여러 개의 수식을 동시에 투고할 때는 (1a), (1b), (1c), ...으로 표기한다.
- 그림과 표를 본문 안에서 참고할 경우는 Fig. 1, Fig. 2, Table 1 (a), Table 2 등으로 표기하고 수식도 마찬가지로 언급한다. 다만 두 개를 동시에 비교 언급하는 경우 Fig. 1 (a) and Fig. 2 (c)과 같이 사이에 'and'로 처리한다.
- 참고문헌을 인용할 때에 저자가 1명일 경우 : Hong (1990)는 ..., 저자가 2명일 경우 : Hong and Lee (1959)는 ..., 저자가 3명 이상일 경우 : Hong et al. (1982)는 ... 등으로 표기한다.

13. 단위는 SI 단위계로 통일하여 표현한다.

14. 필요 시 연구에 대한 조연, 자료 제공 및 연구비 지원 등 제반 사항에 대해 감사의 글을 표할 수 있다.

15. 본문 중에서 참고문헌의 인용을 괄호 내에 표기하고자 할 때, 저자명과 연도를 겹마로 구분한다. 인용문헌이 연속으로 2개 이상일 경우 연도순으로 나열하며 세미콜론으로 구분한다. (예) (Hopke, 1990; Lin et al., 1989).

16. 참고문헌은 국문, 영문 원고에 관계없이 모두 영어 (저자명의 알파벳 및 출판연도의 순으로 나열)로 작성해야 한다. 국문논문이지만 영문초록이 있는 경우 문헌명에 "in Korean with English abstract"를 괄호 속에 넣어 추가한다. 저자나 편집자의 이름 기재는 저자수와 관계없이 전원을 표기해야 한다.

17. 참고문헌 표기양식은 다음 예에 따른다.

- 학술잡지 (예) Gamelin, F.X., Baquet, G., Berthoin, S., Thevenet, D., Nourry, C., Nottin, S., Bosquet, L., 2009. Effect of high intensity intermittent training on heart rate variability in prepubescent children. Eur J Appl Physiol 105:731-738.
- 온라인 잡지 (예) Slifka, M.K., Whitton, J.L., 2000. Clinical implications of dysregulated cytokine production. J Mol Med. doi: 10.1007/s001090000086.
- 단행본 (예) South, J., Blass, B., 2001. The future of modern genomics. Blackwell, London.
- 단행본 내의 chapter (예) Brown, B., Aaron, M., 2001. The politics of nature. In: Smith, J. (ed.) The rise of modern genomics, 3rd edition, Wiley, New York, pp. 230-257.
- 학위논문 (예) Trent, J.W., 1975. Experimental acute renal failure. Dissertation, University of California.

18. 저자의 판단 하에 과도하게 기호가 사용된 경우 정리의 필요성이 있을 시 기호를 따로 정리한다.

19. 부록은 저자의 판단 하에 직접적으로 본문에 언급하기에는 중요성이 떨어지지만 포함하는 경우에 이해에 도움이 될 것으로 판단되는 경우 포함할 수 있다.

제 6 조 (전문가심사 과정)

본 학회에 투고된 원고는 전문가 심사과정을 통해 평가된다. 편집위원회는 심사위원과 편집위원회의 의견을 토대로 게재여부를 결정한다. 전문가심사 과정에 대한 자세한 사항은 본 학회지 심사규정에 기술되어 있다.

제 7 조 (심사료와 게재료)

- 심사료 : 논문 심사는 논문 접수와 함께 논문심사료를 납부하는 즉시 심사절차에 따라 진행된다. 심사 절차를 통해 최종 게재가 확정된 경우 게재료를 납부한다. 제5조의 원고 분량을 기준으로 초과되는 경우 페이지 당의 추가 비용을 지불하여야 한다. 천연색 인쇄 등 특수 제작에 따른 추가 경비는 저자가 실비로 부담한다.
- 긴급 심사료 : 논문의 투고자는 필요에 따라 제출 논문에 대한 긴급 심사를 요청할 수 있다. 이때 투고자는 긴급 심사료를 납부하여야 한다.

제 8 조 (연구출판윤리)

논문의 투고자는 본 학회지 연구윤리 규정에 따라 논문의 투고 이전에 연구 부정 행위가 저촉되지 않는지를 확인하여야 한다. 투고된 원고의 연구부정행위에 대해서는 Committee on Publication Ethics (COPE)를 따른다. 투고된 원고의 중복게재 여부는 CrossCheck을 통해 확인한다.

제 9 조 (저작권)

투고된 원고의 게재가 확정되면 저자는 저작권 이양 동의서를 본 학회 편집부에 제출하여야 한다. 본 학회지에 게재되는 모든 원고에 대한 저작권은 한국제4기학회가 소유한다.

제 10 조 (발간 및 발간예정일)

본 학회지 발간은 년 2회로 하며 발간예정일은 6월과 12월의 말일로 한다.

제 11 조 (위임사항)

기타 본 규정에 명시되지 아니한 사항은 본 학회의 편집위원회의 결정에 따른다.

부 칙

제 1 조 (시행일)

본 규정은 2016년 11월 16일부터 시행한다.