

(기술노트) PMIP4의 제4기 기후 재현 실험 소개

전상윤*, 김성중

한국해양과학기술원 부설 극지연구소

(Technical Note) Introduction of PMIP4 Experimental Design for Simulating Quaternary Climates

Sang-Yoon Jun*, Seong-Joong Kim

Korea Polar Research Institute

요 약 : 4차 고기후모델링간 상호비교연구 (Paleoclimate Modeling Intercomparison Project phase 4: PMIP4)는 6차 접합모델간 상호비교연구 (Coupled Model Intercomparison Project phase 6: CMIP6)와 연계하여 제4기의 여러 시기에 대한 기후 재현 실험을 수행하고 있다. 여러 모델링 기관은 고유의 모델을 이용하여 CMIP6 DECK 실험군의 산업혁명기 이전 기후 실험 (*piControl*)을 바탕으로, 6 ka 홀로세 중기 실험 (*midHolocene*), 21 ka 마지막 최대빙하기 실험 (*lgm*), 127 ka 마지막 간빙기 실험 (*lig127k*)의 평형 기후실험들과, 850-1849 CE 마지막 천년 실험 (*past1000*), 21-9 ka 마지막 퇴빙기 실험, 140-127 ka 두 번째 마지막 퇴빙기 실험 등의 점진적 기후변화 실험들을 수행하고 있다. 이 기술노트에서는 이 PMIP4-CMIP6의 Tier 1 실험들과 경계 조건들을 소개하고 제4기 기후의 이해를 위해 추가적으로 수행중인 Tier 2와 Tier 3 실험들을 정리하였다.

주요어 : PMIP4, 제4기 기후모델 실험, CMIP6

Abstract : In the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project phase 4 (PMIP4), various experiments for quaternary climatic change are being carried out along with the Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6). With the CMIP6 preindustrial climate experiment (*piControl*), the equilibrium climate simulations of 6 ka Holocene experiment (*midHolocene*), 21 ka Last Glacial Maximum experiment (*lgm*), and 127 ka Last Interglacial experiment (*lig127k*) experiment, and transient climate simulations of 850-1849 Common Era Last Millennium experiment (*past1000*), 21-9 ka last deglaciation, and 140-127 ka penultimate deglaciation experiment have been carried out under PMIP4 protocols by several modeling groups. In this technical note, important physical parameters and boundary conditions of these Tier 1 experiments and a list of additional Tier 2 and 3 experiments are summarized.

Key words : PMIP4, Quaternary simulation, CMIP6

1. 서론

기후모델을 이용하여 과거 기후를 재현하는 고기후 모델링은 프록시 자료의 시공간적인 제약, 계절적 편향성 등을 보완하여 과거 기후를 이해하는 중요한 연구 방법으로 활용되어 오고 있다. 6천 년 전 홀로세 중기, 2만 1천 년 전 마지막 최대빙하기, 약 13만 년 전 마지막 간빙기 등 제4기 여러 시기의 기후 역시 이러한 프록시 복원 기록과 고기후모델링을 통해 해당 시기 기후의 특성과 여러 기후 되먹임 과정들의 역할들이 규명되고 있다(Braconnot et al., 2007; Otto-Bliesner et al., 2006).

기후모델링은 수치 해석 과정에서의 오차와 자연 현상의 모수화 과정에서 발생하는 오차 등에 따른 모의의 불확실성을 가지고 있으며, 이를 개선하기 위하여 자연현상 모수화의 개선, 수치해석 방법의 개선 등 다양한 연구가 수행되어 오고 있다. 이러한 기후모델링의 불확실성을 개선하기 위한 방안의 하나로, 다양한 모델을 동일한 기후강제력 및 경계조건을 사용하여 기후를 재현하고 이 결과 간의 상호비교를 통해 모델을 검증, 개선하고 기후재현의 정확도를 향상시키는 다중모델 비교 연구(Model Intercomparison Project, MIP)가 널리 활용되기 시작하였다(Touzé-Peiffer et al., 2020). 고기후 모델링 역시, 불확실성의 개선과 자료의 다양성 확보를 위해 고기후모델링간 상호 비교 연구(Paleoclimate Modeling Intercomparison Project; PMIP)를 통해 다중 모델 비교연구를 수행해오고 있으며, 1차 연구가 시작된 이래 현재 4차 상호비교연구까지 홀로세 중기, 마지막 최대빙하기 등 제4기의 주요 기후 이벤트를 다양한 모델을 이용하여 재현하여 왔다(Kageyama et al., 2001; Crucifix et al., 2005; Schmidt et al., 2014; Kageyama et al., 2018). 또한 이러한 수치 재현 결과들은 해당 시기 기후 특성에 대한 이해 제고와 함께

해당 모델로 생산되는 온실기체 증가에 대한 미래 기후 변화 전망의 비교 자료로 활용되어 왔다.

이 기술노트에서는 제4차 고기후모델링간 상호 비교 연구에서 수행중인 제4기의 기후를 연구하기 위한 여러 실험 방안들을 소개하고, 해당 실험의 설정과 주요 경계조건들을 소개하여 제4차 고기후모델링간 상호비교 연구 자료의 활용성을 높이고자 한다.

2. PMIP 및 CMIP 소개

2.1. PMIP의 진행

급격한 기후 변화에 따른 기후변화 기작과 기후되먹임 과정의 이해의 필요성에 따라, 이를 위한 고기후모델링 방향 설정과 모델 성능 평가를 위해 1990년대 초반부터 1차 고기후모델링간 상호비교연구(PMIP1)가 시작되었다. 이 PMIP1에서는 대기모델을 이용한 홀로세 중기(6 ka)와 마지막 최대빙하기(21 ka)의 기후 재현 실험이 수행되었다(Kageyama et al., 2001). 이어 수행된 2차 고기후모델링간 상호 비교 연구 (PMIP2)에서는 대기-해양 접합모델과 대기-해양-식생모델을 이용하여 PMIP1과 같은 홀로세 중기와 마지막 최대빙하기의 모의를 수행하였다(Crucifix et al., 2005).

3차 고기후모델링간 상호비교 연구(PMIP3)부터는 5차 접합모델간 상호비교연구(Coupled Model Intercomparison Project phase 5; CMIP5)의 고기후 실험을 주도적으로 수행하는 방식으로 수행되었고, 추가적으로 PMIP3 고유의 최근 천년 실험(Last Millennium) 등의 점진적 기후 변화 실험들이 제안, 수행되었다(Schmidt et al., 2014).

2.2. CMIP6 및 PMIP4 소개

여러 상호비교연구들이 활성화되고, 접합기후 모델이 이러한 상호비교연구의 기본 실험도구로

Table 1. A brief summary of PMIP4 experiments

| experiment | period | remark |
|--|-------------|-----------------------------|
| Last millennium (<i>past1000</i>) | 850-1849 CE | PMIP4-CMIP6 |
| mid-Holocene (<i>midHolocene</i>) | 6 ka | PMIP4-CMIP6 (entry card) |
| Last Glacial Maximum (<i>lgm</i>) | 21 ka | PMIP4-CMIP6 (entry card) |
| Last Interglacial (<i>lig127k</i>) | 127 ka | PMIP4-CMIP6 |
| mid-Pliocene Warm Period (<i>midPlioceneEoi400</i>) | 3.2 Ma | PMIP4-CMIP6 |
| Last Deglaciation | 21-9 ka | PMIP4 |
| Penultimate Deglaciation | 140-127 ka | PMIP4 |
| DeepMIP | ~50 Ma | PMIP4 |

활용됨에 따라 여러 상호비교연구들과 CMIP간의 관계 정립의 필요성이 제기되었다. 이러한 여러 모델링간 상호비교연구와 CMIP간의 관계 정립, 그리고 CMIP의 활용성 강화를 위하여 6차 CMIP은 다음과 같이 3개의 주요 기능을 갖는 방식으로 설계되었다(Eyring et al., 2016). 첫 번째 구성요소는 Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima (DECK) 실험군과 CMIP historical simulation 실험으로, 이 실험들을 통해 다른 단계의 CMIP이나 다른 MIP 등에 참여하기 위한 기본 모델 특성 정보를 제공하게 된다. 두 번째 구성요소는 모델 실험의 공통요소, 특성, 문서 등이며, 마지막 구성요소는 앞의 두 구성요소를 기반으로 다양한 과학적 목적을 위해 수행되는 CMIP-Endorsed MIPs이다.

CMIP6-Endorsed MIPs의 경우 17개의 상호비교연구가 있으며, 이러한 MIP은 DECK 및 CMIP6 historical 실험과 직접적으로 연관된 Tier 실험군들을 통해 수행되고 있다. MIP은 필수적인 Tier 1 실험군과 추가적인 실험군 Tier 들을 구성하여 각 MIP의 고유한 과학적 질문들을 해결하도록 고안되어 있다.

4차 고기후모델링간 상호비교 연구 (PMIP4)는 CMIP6-Endorsed MIPs의 하나로 운영되고 있으며, CMIP6의 설계에 따라 CMIP6 DECK의 산업혁명기 이전 기후 실험인 Pre-industrial control (*piControl* 혹은 *esm-piControl*) 실험을 대조군 실험으로 활용한다. PMIP4의 목표는 고기후를 재현하고 현재, 미래 기후 모의 결과와의 비교를 통해 각 모델의 모의 성능을 평가하는 것이다. 또한 다양한 모델의 과거 기후 기록의 생산을 통해 과거 기후에 대한 이해를 높이는 것을 주요 목표로 한다(Kageyama et al., 2018). PMIP4는 필수적인 Tier 1 실험을 포함하는 5개의 PMIP4-CMIP6 기후 실험들을 수행하며, 이외에 추가적인 PMIP4 고유 실험들을 수행하여 제3기와 제4기의 기후변화를 재현하고 있다(Table 1). 본 기술노트에서는 이러한 PMIP4에서 수행하는 총 8개의 실험군에서 mid-Pliocene Warm Period와 DeepMIP을 제외한 6종의 제4기 기후 실험에 대하여 살펴보았다.

3. PMIP4의 제4기 실험 소개

(기술노트) PMIP4의 제4기 기후 재현 실험 소개

Table 2. Summary of the important physical parameters and boundary conditions for the *piControl* experiment

| Condition | Values |
|-------------------------------|---------------------------|
| Orbital Parameters | |
| Eccentricity | 0.016764 |
| Obliquity | 23.459 |
| Parihelion - 180 | 100.33 |
| Vernal equinox | Fixed to noon on 21 March |
| Greenhouse gases | |
| Carbon dioxide (ppm) | 284.3 |
| Methane (ppb) | 808.2 |
| Nitrous oxide (ppb) | 273.0 |
| Solar constant ($W m^{-2}$) | 1360.747 |
| Paleogeography | Modern |
| Ice sheets | Modern |

3.1. Pre-industrial (*piControl*)

CMIP6 DECK 실험인 산업혁명기 이전 실험 (*piControl*)은 PMIP4에 포함된 실험은 아니지만 PMIP4의 주요 대조군으로 사용되는 실험이다. PMIP4의 실험들의 많은 실험 조건들이 이 *piControl* 실험 설정을 참조하고 있다. 해당 조건과 중요한 설정 값을 Table 2에 정리하였다.

3.2. Last Millennium (*past1000*)

Last Millennium (*past1000*) 실험은 서기 850년부터 1849년(850-1849 CE)의 1,000년간의 기후변화를 모의하는 실험으로, 수십년 혹은 그보다 긴 주기의 기후변동성을 모델이 재현할 수 있는지와 외부강제력의 점진적 변화에 따른 내부 변동성 반응을 살펴보는 것이 주요 목적이며 또한 최근 천년의 장기 기후 변화 자료를 제공하는 것을 주요 목적으로 한다(Jungclaus et al., 2017).

이 *past1000* 실험군의 강제력은 이 기간의 지구공전궤도 변화, 온실기체의 변화, 화산활동, 태양활동, 자연 및 인간활동에 의한 지면피복조건의 변화가 사용된다. 이 실험군에는 3개의

Tier 실험군이 존재하는데, 먼저 PMIP4-CMIP6의 공식 경계조건을 사용하는 PMIP4-CMIP6 Tier 1 실험과, 일부강제력의 불확실성을 고려하여 일부 강제력의 자료를 다른 자료 기반 강제력으로 교체하거나(*past1000* with alternative forcings), 태양변화, 화산활동 등 단일강제력만을 사용하는 Tier 2 실험군, 실험 기간을 서기 1년부터 시작하여 2,000년간의 기후변화를 모의하는 *past2k* 등의 Tier 3 실험군이 존재한다.

3.3. Mid-Holocene (*midHolocene*)

Mid-Holocene (*midHolocene*) 실험은 6천 년전 홀로세 중기(6 ka)의 지구공전궤도 변화와 온실기체 변화에 따른 기후를 재현하고, 이 시기의 온도와 수문에 관련한 고기후 기록과의 비교를 주요 목적으로 한다(Otto-Bliesner et al., 2017). 이 시기의 주요 경계조건 설정은 Table 3에 정리되어 있다.

홀로세 중기 실험의 Tier 1 실험은 주어진 지구공전궤도, 온실기체, 태양 상수, 지형 등을 이용한 평형 기후 실험이다. Tier 2 실험의 경우 경계조건과 되먹임 과정의 불확실성의 영향

Table 3. Summary of boundary conditions for the *midHolocene* experiment

| Condition | Values |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Orbital Parameters | |
| Eccentricity | 0.018682 |
| Obliquity | 24.105 |
| Parihelion - 180 | 0.87 |
| Vernal equinox | Fixed to noon on 21 March |
| Greenhouse gases | |
| Carbon dioxide (ppm) | 264.4 |
| Methane (ppb) | 597 |
| Nitrous oxide (ppb) | 262 |
| Solar constant (W m ⁻²) | 1360.747 |
| Paleogeography | Modern |
| Ice sheets | Modern |

을 평가하기 위한 민감도 실험들이 설계되어 있다. 홀로세 초기 기후 모의를 위한 평형실험인 *hol9.5k*, 북극 및 사하라 지역의 식생 조건을 바꾼 실험인 *midHolocene-veg*, 해양으로의 담수유입에 대한 민감도 실험인 *hol8.2k*가 이러한 Tier 2 실험군에 존재한다.

Tier 3 실험군의 경우, 6천년전부터 현재까지의 지구공전궤도와 온실기체의 변화에 따른 6,000년간의 점진적 기후변화 실험인 *past6k* 실험이 제안되어 있다.

3.4. Last Glacial Maximum (*lgm*)

Last Glacial Maximum (*lgm*) 실험은 모든 PMIP 단계에서 수행되어 왔던 2만1천년전 마지막 최대빙하기(21 ka)의 빙하기 기후의 경계 조건에 따른 기후 모의와 그에 따른 기후민감도를 제공하는 실험이다. 지구공전궤도 및 온실기체의 변화 이외에 육상 빙하의 존재에 따른 대륙분포, 해저 지형, 지상 고도 등 여러 경계조건의 차이에 따른 기후를 모의하고 고기후 기록과의 비교하는 것을 주요 목적으로 한다 (Kageyama et al., 2017). 한편 홀로세 중기 실험과 마지막 최대빙하기 실험은 1차 PMIP부터 지속적으로 수행되어온 기후 실험이며, 이

두 실험은 PMIP4-CMIP6의 참여를 위한 필수 실험 (entry card)이다.

온실기체는 복원 기록에 따라 이산화탄소는 190 ppm, 메탄은 375 ppb, 아산화질소는 200 ppb 이 사용되며 태양복사는 Berger (1978)에서 제안된 공전궤도에 따른 일사량을 사용한다. 육빙조건은 GLAC-1D, ICE_6G-C 자료 중 하나를 사용하거나, PMIP3에서 제공한 경계조건을 사용할 수 있다. 육상지형과 해저지형의 경우 육빙의 변화에 따라 지형분포, 지형고도, 해안선 분포, 해저지형 등이 적절하게 처방되어야 하며 이를 위한 계산 과정은 Kageyama et al. (2017)에 자세하게 소개되어있다. 담수의 경우 육빙위에서의 적설량의 변화가 발생한다면, 이러한 변화량이 담수유입량에 반영되어야 한다. 식생의 경우 역학식생모형을 사용하는 것이 권장되지만, 역학식생모형이 사용되지 않는 경우 *piControl*의 식생조건을 처방하도록 제안되었다 (Table 4).

마지막 최대빙하기 시기의 Tier 2 실험은 개별 강제력의 민감도를 살펴보는 실험들이 존재한다. 이 민감도 실험군은 민감도를 살펴보려는 경계조건만 *piControl*의 값으로 설정하고 이외의 경계조건은 LGM 시기의 값으로 설정한다.

Table 4. Summary of boundary conditions for the *lgm* experiment

| Condition | Values |
|-------------------------------------|---|
| Orbital Parameters | |
| Eccentricity | 0.018994 |
| Obliquity | 22.949 |
| Perihelion - 180 | 114.42 |
| Greenhouse gases | |
| Carbon dioxide (ppm) | 190 |
| Methane (ppb) | 375 |
| Nitrous oxide (ppb) | 200 |
| CFCs | 0 |
| Ozone | same as <i>piControl</i> |
| Solar constant (W m ⁻²) | 1360.747 |
| Vegetation | consistent with DECK simulation setting |

LGM-PI-ghg 실험은 온실기체 농도를 *piControl*의 값으로 설정한 실험이며, *LGM-PI-ice*는 육빙조건을 *piControl*로 설정한 실험이다. *LGM-PI-ghg_ice*는 온실기체와 육빙을 *piControl*의 값으로 설정한다.

3.5. Last Interglacial (*lig127k*)

Last Interglacial (LIG) 실험 (*lig127k*)은 홀

로세 중기 실험 (*midHolocene*)과 함께 PMIP4-CMIP6의 두 간빙기 실험의 하나이다. 이 간빙기 실험들의 주요 목적은 온실기체 농도가 현재와 비슷할 때 지구공전궤도의 변화의 영향을 살펴보는 것이다(Otto-Bliesner et al., 2017). 이 LIG 시기의 주요 온실기체의 농도는 *piControl*과 유사하게 이산화탄소 275 ppm, 메탄 685 ppb, 아산화질소 255 ppb로 설정되

Table 5. Summary of boundary conditions for the *lig127k* experiment

| Condition | Values |
|-------------------------------------|--|
| Orbital Parameters | |
| Eccentricity | 0.039378 |
| Obliquity | 24.040 |
| Perihelion - 180 | 275.41 |
| Vernal equinox | Fixed to noon on 21 March |
| Greenhouse gases | |
| Carbon dioxide (ppm) | 275 |
| Methane (ppb) | 685 |
| Nitrous oxide (ppb) | 255 |
| Solar constant (W m ⁻²) | 1360.747 |
| Paleogeography | Modern |
| Ice sheets | Modern |
| Vegetation | prescribed or interactive as in <i>piControl</i> |
| Aerosols | prescribed or interactive as in <i>piControl</i> |

Table 6. Summary of boundary conditions for the last deglaciation experiment

| Boundary condition | Description |
|---|---------------------------|
| Insolation | |
| solar constant | Preindustrial |
| orbital parameter | Berger (1978) |
| Trace gases | |
| CO ₂ | Bereiter et al. (2015) |
| CH ₄ | Loulergue et al. (2008) |
| N ₂ O | Schilt et al. (2010) |
| Ice sheet | ICE-6G_C or GLAC-1D |
| Orography and coastlines | consistent with Ice sheet |
| Bathymetry | consistent with Ice sheet |
| River routing | |
| choose one of the following: | |
| - preindustrial | |
| - transient routing consistent with ice-sheet | |
| - manual/model calculation of river network to match topography | |
| Freshwater flux | |
| choose one of the following: | |
| - melt-uniform | |
| - melt-routed | |
| - no-melt | |

어 있다.

LIG 시기의 육상 빙하의 분포는 해양 프록시 자료에서 추정이 가능하지만 지역별로 큰 불확실성이 존재한다. 이에 따라 *lig127k* 실험의 지형조건은 *piControl*과 동일한 조건을 사용하도록 설계되었다 (Table 5).

LIG의 Tier 1 실험은 *mid-Holocene*과 마찬가지로 주어진 강제력에 대한 평형기후 실험이며, 앞서 언급한 대로 고기후 자료의 불확실성 때문에 지형조건, 육빙, 식생 등은 *piControl*의 현재 조건을 활용하도록 설계되었다.

LIG 시기의 Tier 2 및 Tier 3 실험 역시 *midHolocene* 실험과 동일한 방식으로 설계되어 있다. 먼저 LIG 간빙기의 경우 LIG 종료 시기(116 ka)의 온실기체 농도, 지구공전궤도에 따른 평형 기후 실험이 제안되었다 (*lig116k*). 식생, 육빙 등 경계조건 불확실성의 확인을

위해 북극 및 사하라지역의 식생 조건이 변경된 127 ka 시기 기후실험(*lig127k-veg*), 남극빙상(*lig127k-ais*)과 그린란드 빙상(*lig127k-gris*)의 빙상조건을 변경한 실험이 제안되어 있으며, 하인리히 11 이벤트(Heinrich, 1988)의 담수 유입을 반영한 실험(*lig127k-H11*)도 제안되어 있다. 마지막으로 Tier 3 실험의 경우 127 ka부터 121 ka 까지 6,000년간의 공전궤도 변화와 온실기체 변화에 따른 점진적 기후변화를 모의하는 *lig127to121k* 실험이 제안되어 있다.

3.6. Last Deglaciation

마지막 최대빙하기(21 ka)부터 홀로세 초기(9 ka)까지 마지막 퇴빙기(last deglaciation)의 기후변화를 모의하는 실험이 PMIP4 핵심 실험으로 제안되었다(Ivanovic et al., 2016). 이 시기는 마지막 빙하기에서 현재 간빙기로 전환되

Table 7. Summary of boundary conditions for the penultimate deglaciation experiment

| Forcing | Description |
|--------------------------|---|
| Insolation | |
| orbital parameter | Berger (1978) |
| Trace gases | |
| CO ₂ | Köhler et al. (2017) |
| CH ₄ | Köhler et al. (2017) |
| N ₂ O | Köhler et al. (2017) |
| Ice sheet | Northern Hemisphere : IcIES-NH Greenland : GSM-G Antarctica : GSM-A |
| Bathymetry and orography | Bering Strait : closed Sunda/Sahul shelves : emerged |
| Freshwater | Northern Hemisphere : none Antarctic coast : none |

는 기후 변화 시기이며, 북반구 대륙의 빙상 들이 점차 감소하고 남극 빙상이 대륙붕까지 팽창한 시기이다. 이 시기의 육빙 감소에 따른 기후 시스템 변화의 역동성을 살펴보는 점진적 기후 변화 실험은 그 중요성에도 불구하고 1만년 이상의 장기 적분에 따른 거대한 계산 자원의 필요성, 여러 경계조건들의 장기 변화에 따른 불확성 등의 실험 수행의 어려움으로 인해 PMIP3까지는 수행되지 않았다. 이러한 어려움으로 인하여 PMIP4에서 이 실험은 지구시스템모델이나 기후모델 뿐이 아닌 중간복잡도 지구시스템모델까지도 참여할 수 있도록 설계되었다. 온실기체와 지구공전궤도 등 불확실성이 적은 경계조건의 경우 실험에 참여하는 모델링 그룹은 PMIP4에서 제안된 방법을 따라야하지만, 육빙, 식생, 에어로졸, 담수유입 등은 개별적인 모델링 그룹에서 유연하게 선택할 수 있도록 설계되었다.

21 ka의 초기조건은 마지막 최대빙하기 시기의 평형기후 실험을 통한 평형 초기장 생성이나 26-21 ka의 점진적 기후변화 실험을 통해 생성하여야 한다. 이러한 초기조건에서 21-9 ka 동안의 지구공전궤도, 온실기체, 육빙, 지형 및 해안선, 해저지형, 담수 등의 변화에 따른 기후

변화를 재현한다(Table 6).

3.7. Penultimate Deglaciation

마지막 퇴빙기 이전 가장 가까운 퇴빙기였던 138-128 ka 퇴빙기(penultimate deglaciation; PDG)의 기후 변화 실험 역시 PMIP4의 고유 실험의 하나로 제안되었다. 이 실험의 주요 목적은 마지막 퇴빙기와 PDG의 비교를 통해 퇴빙기 시기의 하인리히 이벤트 등 기후 현상들의 특성을 살펴보는 것이다 (Meniel et al., 2019).

이 실험은 140 ka부터 127 ka까지의 지구공전궤도변화, 온실기체의 변화, 대륙의 육빙 변화, 해수면고도 변화에 따른 점진적 기후변화를 대기-해양접합순환모델로 모의하며, LIG 실험의 Tier 3 실험인 *lig127to121k*와 연계된다.

실험 초기조건은 140 ka 시기의 지구공전궤도, 온실기체(CO₂ 191 ppm, CH₄ 385 ppb, N₂O 201 ppb), 육빙 등을 경계조건으로 하는 평형기후실험을 통해 생성하며, 이후 140-127 ka 동안의 주어진 경계조건의 변화에 따른 기후의 점진적 변화를 재현한다(Table 7).

4. 요약 및 토의

이 기술노트에서는 최근 CMIP6와 PMIP4에서 진행중인 제4기 기후 실험들과 그 설정을 소개하였다. PMIP4는 일부 실험을 CMIP6와 공유하는 CMIP의 Endorsed-MIP의 하나이지만, PMIP은 4차까지 독자적으로 진행되어온 전통적인 모델링 상호비교연구이다. CMIP6가 여러 주제의 다중모델 비교연구를 장려하는 방식으로 진화하면서, PMIP4 실험 결과를 CMIP6 DECK 실험 결과와 다른 MIP에서 수행되는 실험 결과와 비교할 수 있는 등 활용도가 높아지고 있다. 또한 이러한 CMIP과의 연계를 통해 참여모델이 많아지고, 마지막 퇴빙기 등 점진적 기후 변화 실험이 추가되는 등 고기후 실험 결과의 다양성 역시 증대되고 있다. 이러한 PMIP4의 제4기 기후 재현 결과들은 Earth System Grid Federation (ESGF)의 지원하에 세계 각국의 여러 기관에서 배포되고 있으며, CMIP6 실험 결과와 함께 2022년 발간을 준비중인 IPCC 6차 평가보고서(Sixth Assessment Report: AR6)에 활용될 예정이다. PMIP4의 고기후모델링 실험 결과들이 국내 제4기 기후 연구에도 널리 활용될 수 있길 기원한다.

감사의 글

본 연구는 극지연구소 “남극 기후 환경 변화 이해와 전지구 영향 평가” 사업 (PE21030)과 “홀로세 중기 동안의 고기후 프록시와 모델 데이터를 이용한 서북극해 해빙 변화 복원” 사업 (PE21410)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

Berger, A., 1978, Long-term variations of daily insolation and quaternary climatic changes, *Journal of*

Atmosphere Science, 35, 2362-2367.
Braconnot, P. and co-authors, 2007, Results of PMIP2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum - Part 1: experiments and large-scale features, *Climate of the Past*, 3, 261-277
Crucifix, M., Braconnot, P., Harrison, S. P., Ott-Bliesner, B., 2005, Second phase of paleoclimate modelling intercomparison project, *EOS*, 86(28), 264-264.
Eyring, V., and coauthors, 2016, Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958.
Ivanovic, R. F., and Coauthors, 2016, Transient climate simulations of the deglaciation 21-9 thousand years before present (version 1) - PMIP4 Core experiment design and boundary conditions, *Geoscientific Model Development*, 9, 2563-2587.
Heinrich, H., 1988, Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years, *Quaternary Research*, 29, 142-152
Jungclaus, J. H., and Coauthors, 2017, The PMIP4 contribution to CMIP6 - Part 3: The last millennium, scientific objective, and experimental design for the PMIP4 past1000 simulations, *Geoscientific Model Development*, 10, 4005-4033.

(기술노트) PMIP4의 제4기 기후 재현 실험 소개

- Kageyama, M., and Coauthors, 2001, The Last Glacial Maximum climate over Europe and western Siberia: a PMIP comparison between models and data, *Climate Dynamics*, 17, 23-43.
- Kageyama, M., and Coauthors, 2017, The PMIP4 contribution to CMIP6 - Part 4: Scientific objectives and experimental design of the PMIP4-CMIP6 Last Glacial Maximum experiments and PMIP4 sensitivity experiments, *Geoscientific Model Development*, 10, 4035-4055.
- Kageyama, M., and Coauthors, 2018, The PMIP4 contribution to CMIP6 - Part 1: Overview and over-arching analysis plan, *Geoscientific Model Development*, 11, 1033-1057.
- Menviel, L., and Coauthors, 2019, The penultimate deglaciation: protocol for Paleoclimate Modelling Intercomparison Project (PMIP) pahse 4 transient numerical simulations between 140 and 127 ka, version 1.0, *Geoscientific Model Development*, 12, 3649-3685.
- Otto-Bliesner, B. L., and co-authors, 2006, Simulating Arctic Climate Warmth and Icefield Retreat in the Last Interglaciation, *Science*, 311, 1751-1753
- Otto-Bliesner, B. L., and Coauthors, 2017, The PMIP4 contribution to CMIP6 - Part 2: Two interglacials, scientific objective and experimental design for Holocene and Last Interglacial simulations, *Geoscientific Model Development*, 10, 3979-4003.
- Schmidt, G. A., and Coauthors, 2014, Using paleo-climate comparisons to constrain future projections in CMIP5, *Climate of the Past*, 10, 221-250.
- Touzé-Peiffer, L., A. Barberousse, H. Le Treut, 2020, The Coupled Model Intercomparison Project: History, uses, and structural effects on climate research, *WIREs Climate Change*, 11, e648.

2021년 9월 9일 접수
2021년 12월 22일 수정
2021년 12월 22일 승인