슈퍼컴퓨팅정보지 (Journal Supercomputing Information)
Vol. 1, No. 2, December 2013, 1-8

Research Paper

슈퍼컴퓨터를 활용한 고층대기 기후변동 시뮬레이션

김백민*, 최혜선, 김성중
극지연구소 극지기후변화연구부극지연구소 극지기후변화연구부

Simulation of Climate Variability in Upper Atmosphere Using Supercomputer

Baek-Min Kim*, Hyesun Choi and Seong-Joong Kim
Division of Polar Climate Research Korea Polar Research Institute, Inchon, Korea

ABSTRACT

Objectives: Tropospheric and stratospheric atmospheric circulation associated with the sudden stratospheric warming (SSW) was investigated by using simulation results of Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM). This paper describes computational and analytical methods to obtain the results and examines the SSW characteristics obtained by WACCM simulation.

Methods: Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI) super computer system was used for the simulation of more than 40 events of SSW by running the WACCM model 100 years. SSW is identified based on zonal-mean zonal wind criteria at 10 hPa and 60N. To verify the modeling results, Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications (MERRA) assimilation products and European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-Interim reanalysis are used. Climatological sea surface temperature (SST) and sea-ice annual cycle are used as the boundary conditions every year in model experiments.

Results: The observed stratospheric zonal mean temperature and wind were reproduced reasonably well by the model simulation. Also, the model simulation captured the frequency and composite evolution of SSW well similar to the reanalysis products.

Conclusion: SSW becomes an important precursor of seasonal prediction of winter climate variability and extreme weathers. This study shows that the SSW simulation using the KISTI super computer is computationally feasible and the simulation quality is relatively good since the simulation reproduces most of the observed SSW characteristics well.

Keywords: *Sudden Stratospheric Warming (SSW), Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM), Reanalysis*

Introduction

기상학이 유럽과 미국을 중심으로 비약적으로 발전하기 시작한 1930년대 이후로 대기과학자들은 날씨와 기후는 우리가 살고 있는 대류권 즉 지상으로부터 약 10 km 내에서만 일어나는 현상이라고 믿어왔다. 그러나 기상학이 발전함에 따라, 대류권의 파동현상이 성층권으로 전파될 수 있음이 1960년대에 밝혀지기 시작했고 (Charney and Drazin 1961; Matsuno 1971), 관련 연구 분야는 지속적인 발전을 거듭해, 대류권의 행성파 (planetary wave)와 중력파 (gravity wave)가 성층권의 파동현상을 결정하는 중요한 요인임을 알게 되었다. 북반구 겨울철 성층권에서 발생하는 대표적인 기상현상인 성층권 돌연승온 현상 (Stratospheric Sudden Warming, SSW)이 좋은 예

* **Corresponding author:** Baek-Min Kim (bmkim@kopri.re.kr, 032-760-5308)
Korea Polar Research Institute, PO Box 32, Incheon 406-840, Republic of Korea

이다. 겨울철 북위 60도 약 50 km 상공에는 초속 약 50 m s−1 이상의 극야제트 (polar night jet)라고 하는 강력한 바람이 불고 있다. 극야제트의 강한 바람은 항상 일정한 크기를 유지하는 것이 아니라 강약 변동이 매우 심한데, 특히 북반구 겨울철에 1−2년에 한 번 꼴로 1−2주동안 갑자기 바람이 급격히 약화되었다가 회복되는 현상이 나타나곤 한다. 이러한 현상이 발생하게 되면, 역학적 균형관계에 의해 남쪽으로부터 북극쪽으로 급격한 공기 수렴이 유도되며, 수렴된 공기는 북극 상공에서 상/하로 분산되게 되는데, 이로 인해 극야제트 하단에 존재하는 성층권 대부분 지역에서 강한 하강기류가 발생하게 되면, 이는 단열적으로 급격한 온도 상승을 초래하게 된다(Andrews 1987). 이로 인해 북극 성층권의 온도가 갑자기 40°C 이상 상승하는 현상이 나타나는데, 이를 성층권 돌연승온이라고 한다. 즉, 성층권 돌연승온 현상은 외부의 어떠한 열적 소스에 의해 온도가 급증하는 것이 아니라, 역학적인 단열압축에 따른 현상이며 이로 인해 40도 이상의 온도 상승이 나타난다는 것은 매우 경이로운 현상이다.

이러한 성층권 돌연승온의 원인이 최근들어 밝혀지고 있는데, 대류권에서 블로킹(blocking)으로 대표되는 대규모 정체된 공기의 흐름이 나타나고, 이로부터 생성된 대규모의 로스비 행성 파동이 발생하여 연직방향으로 전파되기 시작한다. 연직으로 전파되는 파동은 성층권에서 밀도가 급격히 감소함에 따라 파동에너지 보존법칙에 따라 그 진폭이 급격히 커지면서, 성층권에 존재하는 초속 50 m s−1 이상의 극야제트와 상호작용하게 되는데, 이때 파동의 에너지는 극야제트를 약화시키는데 사용되고 자신은 소산(dissipation)되게 된다. 최근들어 성층권 돌연승온 발생시기에 기후학적 특징들을 종합적으로 정리한 관측 및 수치모의 기반의 연구들이 활발히 진행되고 있다 (Charlton and Polvani 2007; de la Torre, Garcia et al. 2012).

이와는 달리, 성층권의 파동현상이 대류권에 미치는 영향에 대해서는 거의 연구가 이루어지지 않았었으나 최근 십여년 간 위성자료와 모델링의 비약적인 발전과 이에 근거한 대류권−성층권 상호작용을 설명하는 이론의 발달에 따라 성층권, 중간권으로 대표되는 고층대기의 역학적 현상이 대류권의 기상현상에도 큰 영향을 줄 수 있음이 밝혀지고 있다 (Shaw and Shepherd 2008; Shaw and Perlwitz 2010). 특히, 최근 Nature Geoscience에 발표된 연구에 따르면, 북반구 겨울철에 나타나는 대표적인 성층권의 기상현상인 성층권 돌연승온 현상이 나타날 때, 수주 내지 수개월까지 대류권의 기상현상이 영향을 받게 되고, 특히 유럽과 동아시아, 북미 각지에서 성층권 돌연승온과 관련된 한파, 폭설 등의 극한 기상현상이 나타날 수 있음이 입증되었다 (Sigmond, Scinocca et al. 2013).

이렇게 고층대기 기후변동의 중요성이 커지고 있으며, 한반도 날씨 예측과 계절 예측 등을 획기적으로 개선시킬 수 있는 가능성에도 불구하고, 국외의 활발한 연구진행과 대조적으로, 국내에서는 아직까지 관련연구의 진행이 미미한 상태이다. 관측자료만을 이용한 연구는 자료의 시간적, 공간적(특히 연직범위) 제한으로 인하여 분석작업 및 이론정립에 한계가 있으며 수치실험을 통한 연구는 장기간의 자료를 토대로 다양한 해석작업이 가능하지만, 성층권 돌연승온을 모의할 만한 고층대기의 하부변동을 관측과 유사하게 모의할 수 있는 기후모델은 극히 제한적이며, 막대한 계산시간의 소요 및 자원확보의 어려움이 있기 때문이다. 국내에서 고층대기 기후변동이 모의 가능한 대기모형을 사용하여 수행한 연구는 Song and Chun(2005), Choi and Jhun(2008) 등이 있다. 이 연구들은 대류권의 대류활동 등에 따라 발생한 중력파가 성층권, 중간권에 미치는 영향에 대해 Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM)을 활용하여 모수화 개선과 분석을 수행하였다. 그러나WACCM의 초기 버전은 성층권 돌연승온 현상에 있어 중요한 산악파 항력에 대한 모수화가 포함되어 있지 않아 실제 성층권 돌연승온 현상 모의에 적합하지 않다.

본 연구에서는 한국과학기술정보연구원/ 슈퍼컴퓨팅센터로부터의 슈퍼컴퓨터 자원확보를 통해서 국내에서는 처음으로 Whole Atmosphere Community Climate Model Version 4 (WACCM4)를 사용하여 앞서 언급한 관련연구의 어려움을 해결할 수 있었으며, 국내 최초로 수치실험을 통하여 북반구 고위도 지역의 성층권 돌연승온 고ft3_3d_asm_Cpnd logge10.1029nd characteristics of stratospheric sudden warmings in the Whole Atmosphere Community Climate Mode발생과 연관된 대기현상을 이해 할 수 있었다. 해당 연구 결과는 기존에 관측 및 수치실험을 통해서 알려진 특징 등의 확인과 아울러 향후 진행될 관련 연구결과들의 비교와 해석에 사용 될 것이다.

Methods

Whole Atmosphere Community Climate Model Version 4

본 시뮬레이션에 사용된 수치모형은 미국립기상연구소(National Center for Atmospheric Research, NCAR)

에서 개발된 WACCM4이다(de la Torre, Garcia et al. 2012). 기존의 많은 기후 모델들의 연직 경계가 상부 성층권, 하부 중간권 등에 존재하여 고층대기 모의에 무리가 있었음에 반해, WACCM의 경우, 모델 최상층의 높이가 약 150km에 달해 중간권을 모두 포함하고, 확장 모듈을 통해 열권에서의 이온현상까지 모의가 가능하도록 설계되었다. 또한, 이 모형은 단순히 연직층만을 늘리고 상부경계만 높인 것이 아니라, 성층권, 중간권에서 발생하는 다양한 광화학 현상을 모의할 수 있도록 설계되어 기존의 기후모델로 증명하기 어려웠던 오존-대기 상호작용 연구, 태양활동-대기 상호작용 연구 등을 실험해 볼 수 있게 설계되었다.

병렬화

WACCM4의 경우 SPMD방식으로 일컬어지는 Massage Passing Interface(MPI)를 활용한 분산 메모리 방식의 병렬화와 OpenMP 라이브러리를 활용한 SMP 방식 모두 구현되어 있으며, 이 두 방식을 혼용하는 하이브리드 방식으로 운용도 가능하다. 본 연구에서는 SPMD 방식을 채택하였으며, 이 방식으로 코어 개수에 따른 효율성을 검증 후 (Fig. 1), 최적 효율을 보여준 128개의 코어를 사용하여 실제 계산을 수행하였다. SPMD 방식을 사용하기 위해서는 MPI에 사용되는 task개수를 job command file을 통해 전달해 주어야 한다. 아래파일은 IBM 4호기 사용시 활용한 job command file내용중 의 일부이다. 아래 파일에서처럼, job command file에 작업의 타입을 parrallel로 선택하고, 128개의 task를 활용할 예정이므로 작업 유형을 class.32plus 선택하여 준다. Total_tasks의 경우 128개를 기입하였다.

#@ job_type = parallel
#@ class = class.32plus
#@ output = waccm.out.$(jobid)
#@ error = waccm.err.$(jobid)
#@ notification = complete
#@ notify_user = baekmin@gmail.com : 이메일 주소. Job state를 메일로 보내줌.
#@ network.MPI = sn_single,shared,US
#@ rset = RSET_MCM_AFFINITY
#@ mcm_affinity_options = mcm_mem_req mcm_distribute mcm_sni_none
#@ resources = ConsumableCpus(1) ConsumableMemory(1500mb)
#@ wall_clock_limit=72:00:00
#@ total_tasks = 128 : cpu 개수
#@ blocking = unlimited
#@ queue

IBM 에서의 계산 성능을 조사하기 위하여 CPU개수를 증가시키며 30일간 적분 실험 을 수행한 결과를 살펴보면 (Fig. 1), CPU 개수 256개까지 계산속도의 향상이 있음을

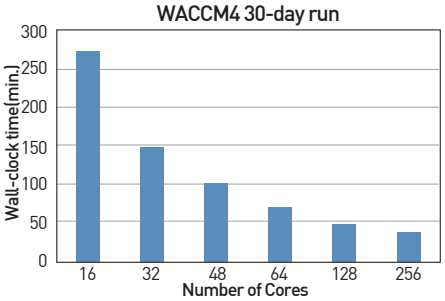

Figure 1. Wall-clock time elapsed for WACCM4 simulation according to the number of CPUs.

확인 하였고, 256개 이상부터는 속도증가가 미미한 것을 확인하였다. 따라서, 본 계산에서는 128개의 CPU를 사용하여 계산을 수행하였으며, CPU 128개 사용시 1개월 적분(모델 시간)시 약 50분 (실계산시간, wall clock time)이 소요됨을 확인하였다.

입력자료 및 해상도

WACCM4의 경우, 기본적으로 대기 모형이므로 일반적인 대기 모형이 받아들이는 해수면 온도자료와 해빙자료를 모형의 하부 경계조건으로 사용한다. 본 실험에서는 1981년부터 2010년까지 월별 Hadley Center Sea Ice and Sea Surface Temperature data set (HadISST)의 30년 월별 평균값을 사용하였다. 이 기후 평균치를 이용하여 총 100년의 적분결과를 산출하였다. 수평적으로 유한 차분법을 적용하여 수평해상도 1.89° 위도 x 2.5° 경도별로 결과치를 산출하였으며, 연직으로 hybrid-sigma 좌표계의 66층을 사용하였다. 산출된 모델 결과는 재분석 자료와 비교하기 위하여 1000 hPa에서 0.0001 hPa까지 43개의 기압고도에서 일별 전구자료를 계산하였다(1.89° 위도 x 2.5° 경도). 모델 수행 결과 비교를 위하여 Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications (MERRA) 재분석 자료 (inst3_3d_asm_Cp)와 미국 National Aeronautics and Space Administration (NASA)의 AURA 위성에 장착된 Microwave Limb

Sounder (MLS) 위성자료를 사용하였다. MERRA 자료는 1979년부터 2012년까지 약 30년 동안 1000 hPa에서 0.1 hPa까지 42개의 고도에서 전구자료(1.25° 위도 x 1.25° 경도)를 제공하며 MLS는 2004년에 발사되어 최근까지 중층대기지역 전반에 걸친 연직범위(316 hPa–0.001hPa)를 포함하여 관측 자료를 제공하고 있다. MERRA 자료는 비교적 장기간의 전구자료를 얻을 수 있고 MLS 위성자료는 비록 짧은 관측기간이지만 성층권부터 중간권 이상의 지역까지 관측하기 때문에 모델 결과 검증에 있어 두 자료를 상호보완적으로 사용할 수 있다.

성층권 돌연승온 분석 방법

성층권 돌연승온 발생시기 동안의 대기 특징은 동서풍, 기온, 남북열속의 변화를 조사하여 진단하였으며 분석방법에 대한 사항은 아래와 같다.

A. 성층권 돌연승온 발생여부

Charlton and Polvani (2007)의 방법을 기반으로 다음의 조건들을 순차적으로 모두 만족하는 경우로 정의하였다.

1) 북반구 겨울철은 매년 10월1일부터 다음해 3월31일까지로 정의한다.
2) 해당기간동안 10 hPa 고도, 북위60도에서 동서방향에 대해서 평균한 동서풍(zonal–mean zonal wind [u], 이후 간략히 동서풍으로 언급)이 서풍에서 동풍으로 바뀌는 날 ([u]〈0)을 중심날짜(central date)로 정의한다. [ ]는 동서평균 값을 의미한다.
3) 늦겨울철에 봄철로 계절이 전이되면서 발생하는 final warming과의 구별을 위해서 중심날짜는 적어도 3월 말을 기준으로 10일 전에는 시작되어야 하며, 3월 말까지는 동서풍이 서풍([u]〉0)으로 돌아와야 한다.
4) 20일 이내에는 다른 성층권 돌연승온이 연달아 발생하지 않는다.

B. Temperature Polar Cap Index (TPCI)

북극 기온변화의 강도 및 부호를 나타내는 값으로 사용하기 위하여 PCI를 계산하였다. PCI는 각 고도에서 기후값으로부터의 기온편차를 북위65도에서 90도지역에 대해 면적평균 한 뒤에 전체기간에 대한 표준편차로 나누어 계산된다. 양과 음의 PCI값은 극지역의 기온이 평년보다 높고 낮음을 각각 나타낸다.

C. 남북열속(Meridonal heat flux, MHF)

1) 남북바람(V)과 기온(T)의 동서평균값으로부터의 편차를 계산한다 (V*, T*). *는 동서방향으로부터의 편차를 표시한다.
2) V*와 T*의 곱을 계산 한 후에 동서평균 한다 ([V*T*]).
3) 남북방향 열속의 일별 기후값으로부터의 편차를 계산한다(([V*T*]′). ′은 기후값으로부터의 편차를 표시한다.
4) 3)의 [V*T*]′을 100 hPa 고도에서 45°N–65°N 지역에 대해서 면적평균을 한다.

Results

평균장 모의 검증

WACCM4의 성층권 돌연승온 모의 성능을 검증하기에 앞서, WACCM4가 기본적인 계절 평균 바람장과 온도장을 얼마나 관측과 유사하게 모의하는지를 살펴보기 위하여 먼저 경도 방향으로 평균된 바람장의 분포에 대한 관측 재분석 자료(Fig. 2)와 WACCM4 시뮬레이션 결과를 비교하여 보았다(Fig. 3). Figure 2는 MERRA자료로 계산된 31년 평균 동서방향 바람 풍속을 위도–고도 별로 나타내고 있다. MERRA자료의 경우, 지상 약 60 km까지 존재하므로, 중간권 상부 아래까지만 대기 순환장이 나타나 있다. 북반구 겨울인 Fig. 2a와 남반구 겨울철인 Fig. 2b

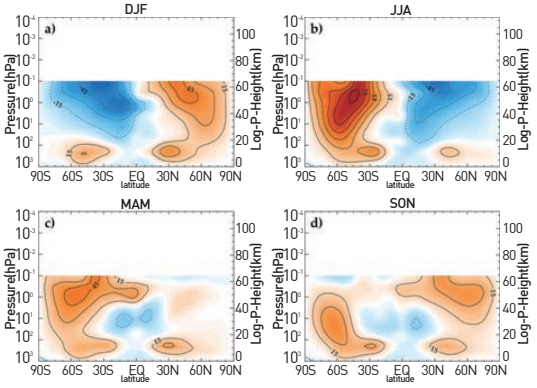

Figure 2. Climatological zonal-mean zonal wind for a) December-January-February (DJF), b) June-July-August (JJA), c) March-April-May (MAM), and d) September-October-November (SON) obtained by MERRA reanalysis. Climatology is obtained using the data during 1979-2010.

을 비교해 보면, 성층권에 겨울 반구에서 위도 약 60°, 고도 50 km에서 강한 동서 방향 바람 즉 편서풍이 불고 있음을 확인할 수 있다. 반대로, 여름 반구에는 성층권을 중심으로 대부분 편동풍이 불고 있음도 알 수 있다. 겨울 반구의 최대 풍속은 대류권으로 이어지며 대류권계면 근처 약 10 km상공에 존재하는 아적도 제트류와 만나서 전체적인 편서풍의 띠를 이루게 된다.

Fig. 2a와 Fig. 2b를 비교해 보면, Fib. 2b 남반구 성층권에 존재하는 극야제트의 세기가 Fig. 2a 북반구 성층권 극야제트의 세기에 비해 훨씬 강함을 알 수 있다. 남반구 극야제트(Fig. 2b)의 경우 약 60 km상공에서 풍속이 80 m s−1를 넘고 있음을 알 수 있다. 이러한 반구별 특징은, 두 반구의 서로 다른 대륙분포에 그 원인이 있다. 북반구에 존재하는 양 대륙은 대규모 행성 로스비파의 근본 원인이 되어서 북반구 겨울철 상향 전파하는 행성파가 남반구 겨울철에 비해 훨씬 많다. 따라서, 이 행성파는 성층권으로 전파되면서 시간에 따라 크기가 증폭되는데, 이 경우, 파동 에너지는 평균류를 감속하는데 사용된다(Andrews 1987). 따라서, 북반구가 같은 겨울반구 일지라도 남반구에 비해 극야제트의 세기가 훨씬 약하게 된다. 또한, 이렇게 형성된 극야제트의 세기는 상층으로 전파되는 파동의 진로에 매우 중요한 역할을 하는데, 그 이유는 대기 파동의 경우, 평균류가 편동풍일 경우 전파할 수 없으며, 또 연직 바람쉬어가 강할수록 행성파는 상층으로 전파되면서 적도 쪽으로 굴절되어 가기 때문에 북극권 상공에 존재하는 성층권 극야제트에 영향을 주기 힘들어지게 된다. 따라서, 남반구에서 돌연승온 현상은 극히 드문 현상이어서 단 한번 2002년에 관측된 바 있다.

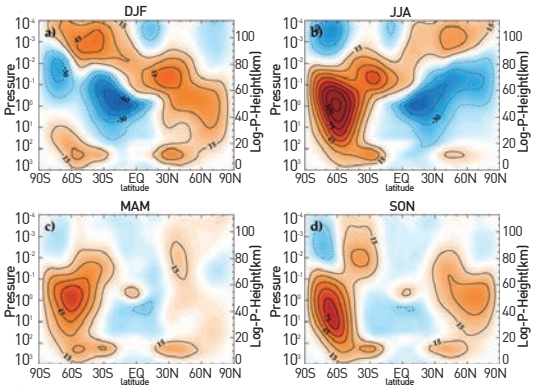

Figure 3. Climatological zonal-mean zonal wind obtained by 70 years average of WACCM simulation for a) DJF, b) JJA, c) MAM, and d) SON. Climatology is obtained using the simulation data of last 70 years

Figure 3는 총100년간의 시뮬레이션 기간중 마지막 70년 자료를 이용하여 구한 WACCM4가 모의한 계절 평균 동서 방향 평균 바람장을 보여준다. Figure 2의 해당 계절 관측과 비교하여 볼 때, WACCM4는 평균류 모의 성능이 매우 뛰어남을 알 수 있다. 특히, 시뮬레이션 결과는 우리가 본 연구에서 주로 분석하고 있는 각 반구 겨울철 평균 바람장이 봄철, 가을철 평균장에 비해 더 유사함을 알 수 있다. Figure 2에서 MERRA자료가 65 km 이하만 존재하여 중간권에 존재하는 바람장 분석이 불가능함에 비해 WACCM4의 경우 중간권의 대부분의 영역을 모의해 내고 있음을 확인할 수 있다. WACCM4의 경우, 관측자료로서 해수면 온도와 해빙의 기후 값만을 하층 경계조건으로 사용하였을 뿐이므로, 이를 감안할 때 WACCM4의 모의 성능이 적어도 평균류를 모의하는데 있어 우수함을 확인하였다. 평균 바람장 외에도, 본 연구에서 동서 평균 온도장을 분석해 본 결과, 동서 평균 온도장의 경우도, 동서 바람장과 같이 재분석 자료와 매우 유사한 패턴을 보임을 확인하였으며, 역시 겨울 반구에서의 모의 결과가 관측과

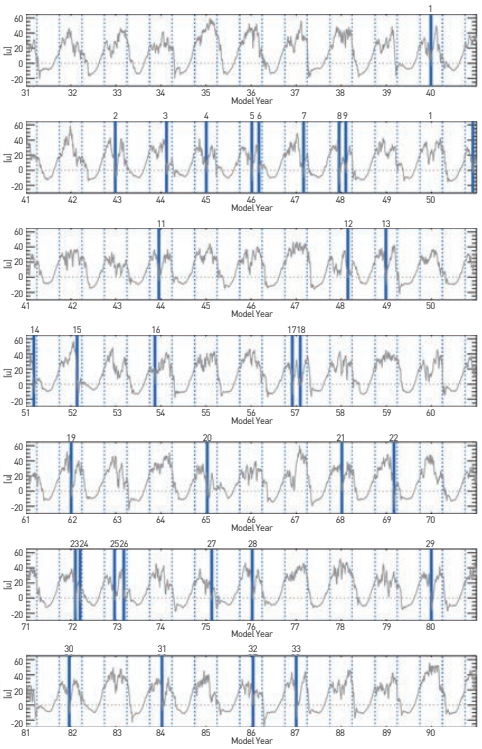

Figure 4. Daily zonal-mean zonal wind from WACCM year 31 to 100 at 10 hPa and 60°N (gray lines). Blue lines indicate the central dates which is the first day zonal-mean zonal wind becoms easterly during winter season ([u]<0).

더 유사하였다. 본 연구에서 평균장에 대한 정량적 검증은 수행하지 않았으나, 겨울 반구에서의 평균류 모의 성능이 우수하였으므로, 행성파를 매개로 한 대류권-성층권 상호작용 및 성층권 돌연승온 모의에 충분히 활용할 수 있음을 확인하였다.

성층권 돌연승온 모의검증

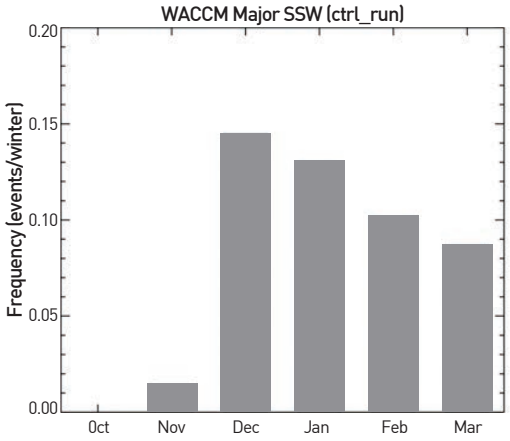

Figure 5. Monthly frequency of WACCM SSW events.

앞에서 제시된 성층권 돌연승온 발생 여부를 판단할 수 있는 기준을 사용하여 시뮬레이션에서 성층권 돌연승온 발생이 감지된 중심 날짜를 표시해 보았다(파란 실선, Fig. 4). 그림에 표시된 중심 날짜들의 개수는 모두 33개로, 모델 연도 31년부터 100년까지 총 69개의 겨울철 동안 총 33번의 돌연승온이 발생하였음을 의미한다. 즉, 전체 겨울철 대비 돌연승온 발생빈도는 0.48로 기존의 관측에서 2년에 1번 정도 발생한다고 알려져 있는 수준과 거의 유사한 수준이다(de la Torre, Garcia et al. 2012). 돌연승온 발생빈도를 월별로 세분화해서 살펴 보면 12월과 1월에 상대적으로 높은 빈도수가 확인되며(Fig.5), 이는 de la Torre, Garcia et al. (2012)의 WACCM을 이용한 계산 값과 거의 유사하다.

Figure 6은 돌연승온 발생 전후 60일 동안, 60°N-90°N 지역에 대해서 면적 평균한 동서풍의 합성도(composite)이다. 중심날짜 주변에서, 극야제트의 강한 편서풍이 편동풍으로 풍속 역전이 성층권 약 50 km를 중심으로 급격하게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 한편, 같은 시기 중간권 80 km 상층에서는 이와는 반대로 서풍의 바람이 시간차 없이 거의 동시에 나타나는 것을 알 수 있다. 중심날짜 이후 동풍의 평균 지속기간은 약 6일로 Charlton et al. (2007)의 NCEP/NCAR 자료를 이용하여 계산된 5.2일과 거의 비슷하다. Table 1에 지속기간의 길고 짧음에 따라 돌연승온 발생 횟수를 세분화하여 정리하였다. Charlton et al. (2007) Table 2의 재분석 자료의 결과와 비교했을 때 중간기간 (medium periods)의 발생빈도는 비슷한 수준인 반면에 짧은 기간(short periods)에는 낮고, 긴 기간(long periods)에는 상대적으로 높은 빈도수를 보인다.

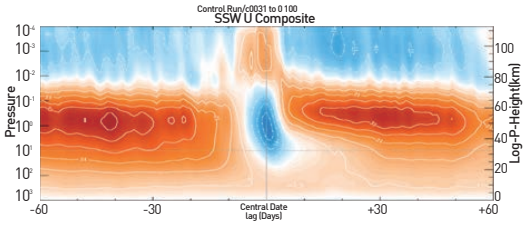

Figure 6. Composite of WACCM daily zonal-mean zonal wind averaged over 60°N-90°N .

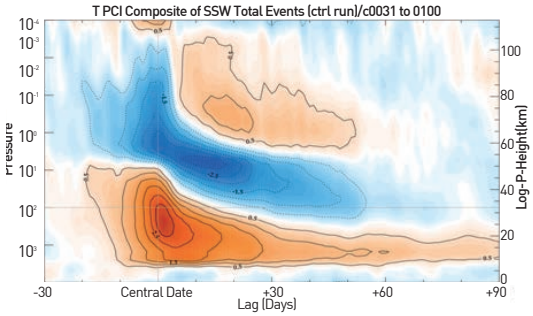

Figure 7. Composite of WACCM temperature polar cap index during SSW events periods. Solid lines/red shaded regions and dotted lines/blue shaded regions indicate positive and negative PCI, respectively. The contour interval is 0.5 from +/- 0.5.

Figure 7은 WACCM 돌연승온 발생시기에 극지역 평균된(65°N-90°N 지역) 온도의 시간-고도 구조를 보여준

Table 1. Summary of SSW statistics. The numbers in parentheses are the percentage of short, medium, and long SSW events

Case	Total SSW	SSW/winter	Duration				MHF [K m s-1]
			Mean	Short <4days	Medium 4-9 days	Long >9days	
WACCM	33	0.48	6.0	9 (27%)	18 (55%)	6 (18%)	9.84

다. 중심 날짜 기준으로 살펴보았을 때, 돌연승온이 발생하는 중심날짜에서 성층권 약 25 km를 중심으로 강한 온도 상승이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. Figure 6에서 확인한 바 북극지역의 편서풍은 약 50 km 상공에서 가장 약화되는데 온도는 그보다 훨씬 낮은 25 km에서 상승한다. 이는 재 분석 자료에서도 동일하게 확인되는 부분으로서, 50 km 상공에서 약화된 극야제트로 인해 공기의 수렴이 북극지역으로 발생하고, 이로 인한 발산현상으로 성층권에는 하강기류, 중간권에는 상승기류가 생기게 된

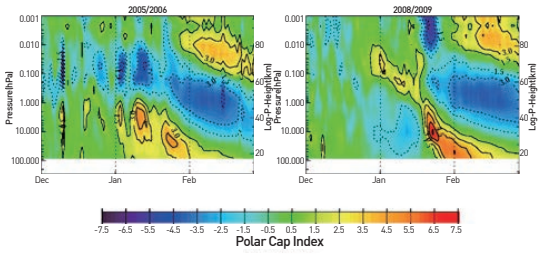

Figure 8. Temperature polar cap index (TPCI) from MLS during SSW events. The central dates are 21 January 2006 and 24 January 2009.

다. 따라서, 하강기류가 가장 강한 25 km 상공에는 단열압축으로 인한 온도 상승, 중간권에서는 상승으로 인한 단열 팽창, 온도 하강이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 기온구조는 동일한 시기에 보여진 동서풍의 구조(Fig.

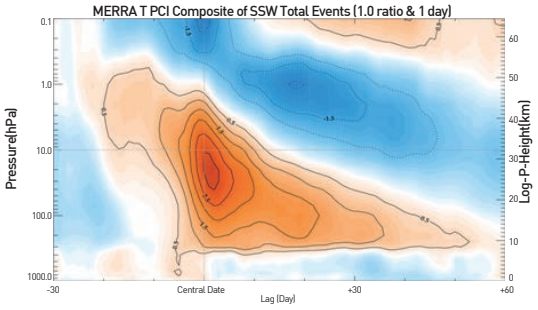

Figure 9. Same as Figure 7 but for MERRA temperature polar cap index.

6)와 관련 있다. 한편, 성층권에서 나타나는 양의 기온의 패턴은 고도에 따라 지속시간이 다른 것으로 나타나는데 이러한 이유는 복사 감쇠 시간규모(radiative damping time scale)가 중부성층권에서는 약 10일, 하부성층권에서는 약 40일로 차이를 보이기 때문이다 (Newman and Rosenfield, 1997; Charlton and Polvani, 2007).

Figure 8은 성층권 돌연승온이 발생했던 2005/2006과 2008/2009 겨울철에 관측된 MLS TPCI이다. 2006년과 2009년 1월 말의 central date를 기준으로 WACCM과 비슷한 기온의 연직구조를 보인다. MERRA 자료를 이용한 TPCI 인 Figure 9에서도 비록 고도가 0.1 hPa까지 제한되어 있으나 WACCM의 기온구조와 유사하다. 이러

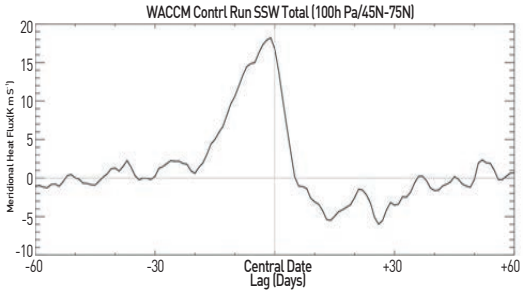

Figure 10. Composite meridional heat flux anomaly averaged over 45°N-75°N at 100 hPa during SSW events periods.

한 관측 및 재분석 자료와의 비교를 통해 WACCM을 이용한 수치실험에서 성층권 돌연승온 발생시기 동안에 북반구 지역의 기온변화 구조가 잘 모의되고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 10은 성층권 돌연승온 발생시기 동안 100 hPa 고도에서 WACCM 남북열속의 시간변화이다. 성층권에 동풍이 나타나기 약 20일 전부터 서서히 양의 값이 증가하다가(poleward heat flux) 중심날짜 바로 전에 최대값을 보이고 급격히 감소한다. 성층권 돌연승온이 발생하기 전의 평균 남북열속의 값은(중심날짜 전 20–0일 평균값) 약 9.84 K m s–1로 Charlton and Polvani (2007)의 8.5 K m s–1보다 약간 높다.

Discussion

WACCM을 이용한 수치실험을 통해서 성층권 돌연승온 발생시기에 북반구 고위도 지역의 저층–고층 대기 특징을 조사하였다. Table 1은 시뮬레이션 결과를 정리한 것으로, 본문에서 언급한 모든 통계적 수치들이 수록되어 있다. 모델결과 발생빈도, 동서풍, 기온, 남북열속 등은 기존의 관측자료로 분석한 성층권 돌연승온 연구결과들과 수치적, 공간적 분포가 상당부분 잘 일치하여 시뮬레이션이 성공적으로 수행되었음을 확인하였다. 현재 재분석 관측자료가 대부분 그 기간이 50년 미만인 것을 고려한다면, 본 연구에서 확보한 장기간의 시뮬레이션 자료

는 대류권-성층권 상호작용 이해에 그 활용 가능성이 크다. 앞으로 국내 고층대기 연구 활성화를 위해 WACCM을 활용한 다양한 실험을 슈퍼컴퓨터를 이용하여 수행해 나갈 예정이다.

Acknowledgments

이 연구는 한국과학기술정보연구원/슈퍼컴퓨팅센터로부터 슈퍼컴퓨팅 자원과 기술지원을 받아 수행되었으며 (KSC-2012-G3-02), 한국해양과학기술원 부설 극지연구소의 "극지 기후변화 원인 규명을 위한 극진동 구성요소 재현 및 관측 연구" (PE13010) 사업의 제정 지원을 받아 수행되었습니다. Aura MLS 자료는 NASA의 Goddard Space Flight Center (GSFC)의 원영인 박사님으로부터 제공받았습니다.

References

1. Andrews DG. On the interpretation of the eliassen-palm flux divergence. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1987; 113(475): 323-338.
2. Charlton AJ, Polvani LM. A New Look at Stratospheric Sudden Warmings. Part I: Climatology and Modeling Benchmarks. Journal of Climate. 2007;20(3): 449-469.
3. Charlton AJ, Polvani LM, Perlwitz J, Sassi F, Manzini E, Shibata K, Pawson S, Nielsen JE, Rind D. A new look at stratospheric sudden warmings. Part II: Evaluation of numerical model simulations. Journal of Climate. 2007;20:470-488, doi:10.1175/JCLI3994.1.
4. Charney JG, Drazin PG. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. Journal of Geophysical Research. 1961;66(1): 83-109.
5. Choi HJ, Chun HY. Effects of vertical resolution on a parameterization of convective gravity waves. Atmosphere. 2008;18:121-136 (Korean).
6. De La Torre L, Garcia RR, Barriopedro D, Chandran A. Climatology and characteristics of stratospheric sudden warmings in the Whole Atmosphere Community Climate Model. Journal of Geophysical Research. 2012;117:D04110, doi:10.1029/2011JD016840.
7. Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. Journal of the Atmospheric Sciences. 1971; 28(8): 1479-1494.
8. Shaw TA, Perlwitz J. The Impact of Stratospheric Model Configuration on Planetary-Scale Waves in Northern Hemisphere Winter. Journal of Climate. 2010; 23(12): 3369-3389.
9. Shaw TA, Shepherd TG. Raising the Roof. Nature Geoscience. 2008;1:12-13.
10. Sigmond M, Scinocca JF, Kharin VV, Shepherd TG. Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings. Nature Geoscience. 2013; 6: 98-102.
11. Song IS, Chun HY. Momentum flux spectrum of convectively forced internal gravity waves and its application to gravity wave drag parameterization. Part 1: Theory. Journal of the Atmospheric Sciences. 2005; 62:107-124.