

HadGEM2-AO RCP8.5 모의에서 나타난 지구온난화 멈춤

위지은¹ · 문병권^{1,*} · 김기영² · 이조한³

¹전북대학교 과학교육학부/융합과학연구소, 561-756, 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567

²(주)포디솔루션, 153-788, 서울특별시 금천구 벚꽃로 244

³국립기상연구소, 697-845, 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

The Global Warming Hiatus Simulated in HadGEM2-AO Based on RCP8.5

Jieun Wie¹, Byung-Kwon Moon^{1,*}, Ki-Young Kim², and Johan Lee³

¹Division of Science Education/Institute of Science Education, Chonbuk National University,
Jeonju 561-756, Korea

²4D Solution Co., LTD., Seoul 153-788, Korea

³National Institute of Meteorological Research, Jeju 697-845, Korea

Abstract: Despite the greenhouse gases like carbon dioxide have steadily increased in atmosphere, the overall trend of the global average surface air temperature has stalled during the last decade (2002-present). This phenomenon is often called hiatus or warming pause, which is challenging the prevailing view that anthropogenic forcing causes warming environment. Our study characterized the hiatus by analyzing the HadGEM2-AO (95 yrs) simulation data based on RCP8.5 scenario. The PC2 time series from the EOF of the zonal mean vertical ocean temperature has been defined as the index that represents the warming pause. The relationship between the hiatus, ENSO and the changes in climate system are identified by utilizing the newly defined PC2. Since the La Niña index (defined as the negative of NINO3 index) leads PC2 by about 11 months, it may be possible that the La Niña causes the warming to be interrupted. We also show that the cooling of the climate system closed tied to the heat penetration into the deep ocean, indicating the weakening the warming rate is due to the oceanic heat uptake. Finally, the global warming hiatus is characterized by the anomalous warming in Arctic region as well as the intensification of the trade wind in the equatorial Pacific.

Keywords: warming hiatus, HadGEM2-AO, La Niña, oceanic heat uptake

요약: 대기 중 이산화탄소 등의 농도가 지속적으로 증가하고 있음에도 최근 10여 년 동안(2002-현재) 전지구 지표 온도는 거의 답보상태에 머물러 있다. 이처럼 온실기체 강제력에도 불구하고, 지구 온난화 경향이 사라진 듯 보이는 현상을 지구 온난화 멈춤(hiatus)이라 한다. 이 연구는 HadGEM2-AO가 모의한 RCP8.5 시나리오 실험(95년간) 자료를 분석하여, 온난화 멈춤 시기의 특징을 분석하였다. 온난화 멈춤 기간을 나타내는 시계열은 동서 평균한 연직 해수 온도 분포를 EOF 분석하여 구한 두 번째 PC (PC2)로 정의하였다. PC2를 이용하여 온난화 멈춤과 엘니뇨와의 관련성, 기후시스템의 변화 등을 분석하였다. 라니냐 지수(NINO3지수에 -1을 곱하여 정의)가 PC2를 약 11개월 앞서는 것으로 보아 라니냐 발생이 온난화 멈춤을 유도할 수 있음을 발견하였다. 또한 기후시스템의 냉각은 해수 표층의 열이 해양 내부로 침강으로 나타남을 보였다. 이는 해양의 열흡수에 의해 전지구 온도 상승률이 약화되었음을 의미한다. 온난화 멈춤 시기에 북태평양과 북반구 극지는 양의 온도 편차가 나타났으며, 열대 해양에서는 무역풍이 강화되었다.

주요어: 온난화 멈춤, HadGEM2-AO, 라니냐, 해양의 열흡수

*Corresponding author: moonbk@jbnu.ac.kr

Tel: +82-63-270-2824

Fax: +82-63-270-2802

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

지난 수십 년 동안 전지구 지표 기온이 상승하였는데 이는 온실기체 배출에 따른 결과인 것으로 확실히되고 있다. 최근 발간된 IPCC 제5차 평가 보고서는 “*It is extremely likely that human influence has been the dominant cause of the observed warming since the mid-20th century*”라며 온난화의 책임이 인류에게 있다는 것을 95% 이상 신뢰하고 있음을 보여준다(IPCC, 2013). 물론 이산화탄소에 의한 기후민감도와 관련한 논란은 여전히 제기되고 있지만(Choi, 2011), 남극 빙벽이 크게 후퇴되는 것(Chang et al., 1998)과 더불어 최근 들어 세계 곳곳에서 자주 발생하는 가뭄, 열파, 폭우 및 홍수 등의 극한 현상들 중 절반 정도는 인간에 의한 기후변화가 주요한 원인으로 여겨지고 있다(Peterson et al., 2013). 또한 인간의 활동은 미래 기후 환경 변화의 주요 원인으로도 작용한다(Chang and Hong, 2011).

지난 60여 년간의 기온 관측 자료를 살펴보면 장기적으로는 전지구 지표의 평균 기온이 증가하는 추세에 있지만, 시기별로는 기온 상승률이 둔화되거나 심지어 기온이 하강하는 모습을 볼 수 있다(Fig. 1). 예를 들어 1950년대부터 1970년대 중반까지는 기온 증가가 거의 멈춰있었고, 이후 1980년대 초반까지 급격히 온도가 증가하였으며, 다시 1990년대 초반에 약간 주춤했다가 2002년까지 대체로 온난해지는 추세를 보이고 있다. 여기서 주목할 만한 특징은 최근 10여 년 동안(2003년-현재) 온난화 추세가 다시 멈추고 있다는 점이다. 지난 세기동안 대기 중으로 배출되는 CO₂ 양이 꾸준히 증가하였음을 고려할 때(Etheridge et al., 1996), 지표 기온의 증가율이 일정하지 않다는 것을 눈여겨볼 필요가 있다. 다시 말하면 CO₂ 증가에 의한 기후강제력이 기후시스템에 지속적으로 제공되면서 지표 기온이 상승하였지만, 간헐적으로 오히려 냉각되었던 시기가 있었다. 이런 현상은 과거뿐만 아니라 미래 기후에도 보일 것으로 예측된다. Easterling and Wehner (2009)는 Coupled Model Intercomparison Project 3 (CMIP3) (Meehl et al., 2007)에 참여한 모델이 Special Report on Emission Scenarios (SRES) (Nakicenovic and Swart, 2000) A2 강제력 시나리오 실험에 따라 모의한 자료를 분석하여 21세기에 지표 기온의 상승률이 거의 없거나 오히려 지표가 냉각되는 시기가 있을 것임을 보였다.

최근 10여년 기간(2002-2013) 동안에 발생한 온난화 추세가 멈춘 현상은 많은 연구자들의 관심을 끌었고, 이에 대한 원인으로 몇 가지 요인들이 제시되었다. 먼저 Solomon et al. (2010)은 2000년 이후부터 지속된 성층권 수증기양의 감소가 지표 기온 감소를 가져왔다고 주장하였다. 또한 다른 원인으로서는 최근 복사에너지 감소(Fröhlich, 2012; Kaufmann et al., 2011), 성층권과 대류권 에어로졸의 증가(Solomon et al., 2011; Kaufmann et al., 2011) 등이 제시되었다.

이에 덧붙여 해양에 의한 열흡수 과정이 온난화 멈춤의 원인으로 크게 주목받고 있다(Meehl et al., 2011; Kosaka and Xie, 2013; Balmaseda et al., 2013; Watanabe et al., 2013; England et al., 2014). Meehl et al. (2011)은 RCP4.5 모델 실험에서 온난화 경향이 멈추는 시기에는 상층(0-300 m) 해양에 저장된 열용량이 감소하고, 하층(300 m 이하)에는 열용량이 증가하는 것을 제시하였다. 이것은 온실기체 증가에 의해 기후시스템에 추가되는 복사에너지가 (지구 표면을 가열하지 않고) 깊은 해양 속으로 침투함을 의미한다. 이와 동시에 열대 동태평양에는 음의 해수면온도 편차가 나타나는 라니냐 시기의 특징을 보였다. 이러한 동태평양의 냉각은 어떤 강제력에 의해서가 아니라 기후시스템의 내부 변동성에서 기인된 것으로 간주되고 있다(Kosaka and Xie, 2013). 이 견해가 사실이라면 현재의 온난화 멈춤은 기후시스템 내부변동에 의한 일시적인 현상으로서 태평양이 따뜻해지는 상태로 되돌아갈 경우에는 온난화가 다시 진행될 가능성이 높다. Kosaka and Xie (2013)는 온난화 멈춤 시기에 워커순환의 강화, 알류산 저기압의 약화, 미국 남부지역에 가뭄의 지속 등 지역기후 변화가 나타남을 보였다. England et al. (2014)은 온실기체에 의한 복사 강제력에도 불구하고 동태평양이 냉각될 수 있는 원인으로 최근 10여 년간 유례없이 강한 무역풍을 제시하였으며, 무역풍 강화가 지속된다면 앞으로 당분간 온난화 멈춤이 지속될 것으로 전망했다.

이처럼 온난화 멈춤 현상은 최근 들어 활발한 관심을 받고 있으며, 대체로 많은 연구들이 해양의 열흡수 과정을 그 원인으로 제시하고 있다. 이때 해양은 동태평양에 음의 해수면온도 편차가 발생하는 라니냐 시기나(Meehl et al., 2011; Held, 2013), 태평양의 장주기 변동인 Interdecadal Pacific Oscillation의 음의 위상 상태(Kosaka and Xie, 2013)인 것으로 알

려지고 있다. 전지구 평균 지표 기온이 엘니소(El Niño-Southern Oscillation)에 크게 영향 받는 것을 (Lean and Rind, 2009; Foster and Rahmstorf, 2011) 고려하면, 엘니소와 온난화 멈춤과의 관련성을 예상할 수 있다. 그러나 이전의 연구들은 이 두 현상을 원인과 결과의 관점에서 깊이 다루지 않았다. 우리는 이 논문에서 두 현상이 연관돼 있다는 것에 덧붙여 라니냐의 발생이 온난화의 멈춤을 유도할 수 있음을 제시하였다. 또한 온난화 멈춤 현상이 나타날 때 해양 내부에서 나타나는 열의 재분배 과정을 이해하려 하였다.

모델 모의 자료

온실기체가 꾸준히 증가하는 환경에서 최근 발생한 온난화 멈춤 현상(Held, 2013)의 특징과 해양의 역할 등을 이해하기 위하여 온난화 시나리오를 이용하여 모의된 모델 자료를 분석하였다. 모델은 영국 기상청이 개발한 HadGEM2-AO (Collins et al., 2011; Martin et al., 2011)이고, RCP8.5 시나리오(Representative Concentration Pathways 8.5 Scenario)를 이용하여 국립기상연구소가 적분한 결과를 분석에 사용하였다. 이 시나리오는 지금의 추세로 온실기체가 배출되는 경우를 가정한 것으로 대기 강제력이 2100년에 8.5 Wm^{-2} 에 이르도록 설계되었다(Van Vuuren et al., 2011).

HadGEM2-AO 모델은 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)에 참여하고 있으며, 에어로졸 과정이 포함된 대기모델, 지면모델, 해양모델, 해빙모델이 결합하여 구성된다(Flato et al., 2013). 대기 모델은 수평 $N96 (1.875^\circ\text{lon} \times 1.25^\circ\text{lat})$ 의 해상도를 가지며, 연직 38층으로 구성돼 있고 대기 최상부의 고도는 38 km이다. 해양 모델은 수평 1° 의 해상도를 갖지만, 적도에서 위도방향 해상도는 $1/3^\circ$ 로 조밀해지며, 연직 방향으로 40개 층을 갖는다.

모델은 다음과 같이 수행되었다. 먼저 산업화 이전 시나리오(pre-industrial) 조건인 대기 중 탄소농도를 286.3 ppm으로 500년 동안 모델 수행을 하여 초기자료를 얻었고, 산업화 시나리오(historical run)라 불리는 인간 활동에 의한 온실기체 및 에어로졸 농도, 지면피복(land cover) 변화, 자연 강제력 변동을 고려한 실험을 1860년부터 2005년까지 수행하였다. 이후 2006년부터 2100년까지 약 95년 동안 RCP8.5 시나

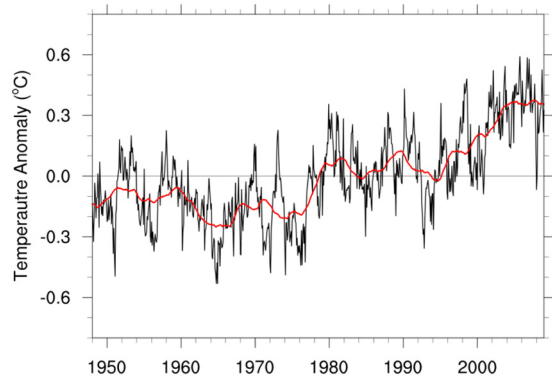


Fig. 1. Time series of the global mean temperature anomaly (black line) based on NCEP data, along with its 2-yr running mean (red line).

나리오를 이용하여 모델을 수행하였는데, 이 연구는 이 결과를 분석하였다. HadGEM2-AO에 대한 자세한 설명과 모델이 모의한 미래 기후의 특징은 Back et al. (2013)에 제시되어 있다.

결 과

모델이 모의한 지구온난화 멈춤

서론에서 관측된 지표 기온 시계열에서 온난화 경향이 둔화된 몇몇 시기가 있음을 알았다(Fig. 1). 유사하게 온난화 경향성이 작아지는 기간을 HadGEM2-AO RCP8.5 모의 결과에도 찾을 수 있다. Fig. 2는 모의된 95년간(2006-2100) 해수면 온도 편차와 지표 기온 편차를 나타내고 있다. 먼저 눈에 띄는 특징은 해수면보다는 대기의 기온 변화량이 크게 나타나는 점인데, 해수면 온도는 95년 동안 3°C 상승하였고, 지표 기온은 약 5°C 정도 증가하였다. 이것은 해양이 상대적으로 천천히 가열되는 것을 나타내는데, 해양의 큰 열용량을 반영하고 있다. Fig. 1의 관측 자료에서 볼 수 있듯이, 모델이 모의한 기후시스템에서도 온난화 속도가 늦춰진 시기가 존재한다. Fig. 2를 통해 찾을 수 있는 이런 시기는 2020년 전후, 2040년대, 2065년 전후반, 2090년 전후 등이다. 이들 중 2015-2025 기간과 2085-2095 기간의 해수면 온도와 지표 기온의 변화를 강조하여 나타냈다(Fig. 2의 작은 그래프). 이들 시기에는 지표 기온 변화율이 작게 나타나고 있다. 모델 모의 자료에서 온난화 멈춤 시기를 객관적으로 찾은 것은 뒤에 제시돼 있다.

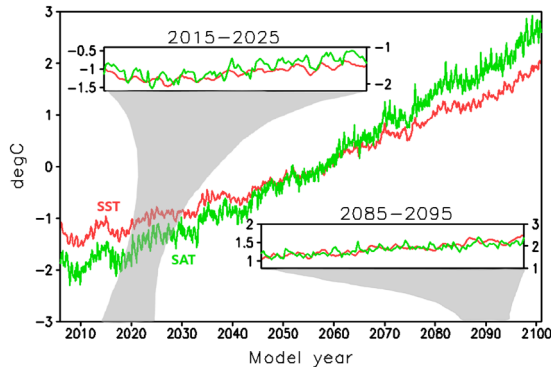


Fig. 2. Simulated global sea surface temperature (SST) (red line) and surface air temperature (SAT) (green line) trends with annual mean removed, highlighting two 11-year global warming hiatus periods.

Meehl et al. (2011)은 모델 실험을 통해 온난화 멈춤의 원인이 온실기체 강제력에 의한 열이 해양에 흡수되는데 있다고 제시하였다. 그들의 모델은 온난화 경향이 둔화되는 시기에 해양 상층(수심<300 m)의 열이 해양 내부(수심>300 m)로 침투되는 것을 보였다. 해양 깊은 곳으로 열이 수송되는 것과 온난화 멈춤의 관련성은 우리 분석에서도 찾을 수 있다. Fig. 3은 해수면으로부터 수심 200 m까지 50 m 간격으로 전구 평균한 해수온도 편차 시계열을 나타낸 것이다. 전체 기간의 온도 변화율은 수심이 깊어짐에 따라 감소하고 있다. 수심 100 m를 기준으로 표층 가까운 곳의 온도 변동은 해수면과 동일한 위상을 갖는 것에 반해, 더 깊은 곳의 해수 온도 변동은 표층과 반대의 위상을 가졌다. 해수면 온도 변동이 대류권 하부 기온 변동과 유사함을 고려하면, Fig. 3은 지구 온난화 멈춤 기간 동안에는 수심 100 m 이상의 깊은 해수에서는 오히려 온도가 상승하는 것을 보여주고 있다. 이는 지구 온난화 멈춤이 해수 표층의 열이 더 깊은 층으로 이동하면서 나타남을 암시하고 있다(Meehl et al., 2011; Trenberth and Fasullo, 2013).

해수 온도의 EOF 분석

온난화가 둔화되는 것이 기후시스템에 어떤 영향을 주는지를 찾기 위한 방법으로, Fig. 2를 통해 찾은 기간과 그 외의 기간의 차이를 분석하는 것을 생각할 수 있다. 또는 만약 온난화가 유지되는 것과 잠시 약화되는 것을 나타내는 인덱스를 얻는다면 회귀분석

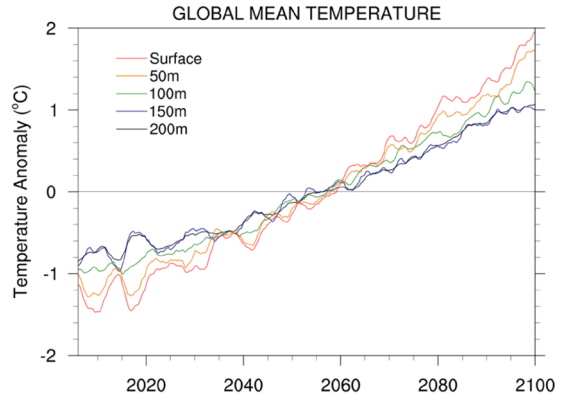


Fig. 3. Simulated global averaged ocean temperature at 0 m (red), 50 m (orange), 100 m (green), 150 m (purple), and 200 m (black). Time series show monthly anomalies smoothed with a 2 year running mean.

등을 통하여 좀 더 통계적으로 유의한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 우리는 이 점을 고려하여, 동서 평균한 해수 온도를 EOF (Hannachi et al., 2007) 분석하여 온난화 멈춤을 나타내는 시계열을 찾고자 하였다. Fig. 4는 처음 두 모드인 EOF1, EOF2 (Fig. 4a, 4b)와 PC1, PC2 (Fig. 4c)를 나타내고 있다. EOF1은 전체 해양에서 양의 변동성이 나타난다. 특히 열대와 북반구 상층에 큰 변동성이 있고, 이것과 함께 북반구 고위도로 향하면서 큰 변동성이 점차 해양 내부로 침투하듯 분포하고 있다. PC1이 선형적으로 증가하는 것을 고려하면, EOF1은 온난화가 진행되면서 열이 점차적으로 해양 깊숙이 흡수되는 것을 반영하고 있다. 특히 큰 변동성이 나타나는 영역이 열대 해양에서 북반구 상층, 그리고 고위도 심해 쪽으로 향하는 것으로 볼 때, EOF1의 특징이 Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)과 연관된 순환(Rahmstorf, 2002)에 기인할 것이라는 추측이 가능하다.

반면에 PC2는 10년 이상 주기성을 드러내고 있다 (Fig. 4c). 이것과 연관된 해양 수온의 변동성은 열대와 중·고위도에서 다른 특징을 볼 수 있다. 열대는 상층에 음의 편차, 중층에 양의 편차가 번갈아 가며 나타나는 경압적 구조가 있으며, 이런 특징은 적도로부터 20°S 범위에서 명확하게 나타난다. 중위도부터 고위도까지는 상하층이 동일한 부호를 갖는 순압적 구조를 보이고 있다(Fig. 4b). 우리는 PC2를 온실기체 강제력이 주어진 환경에서 모의된 온난화 경향성의 증감을 나타내는 시계열로 삼고자 한다. 이를 뒷

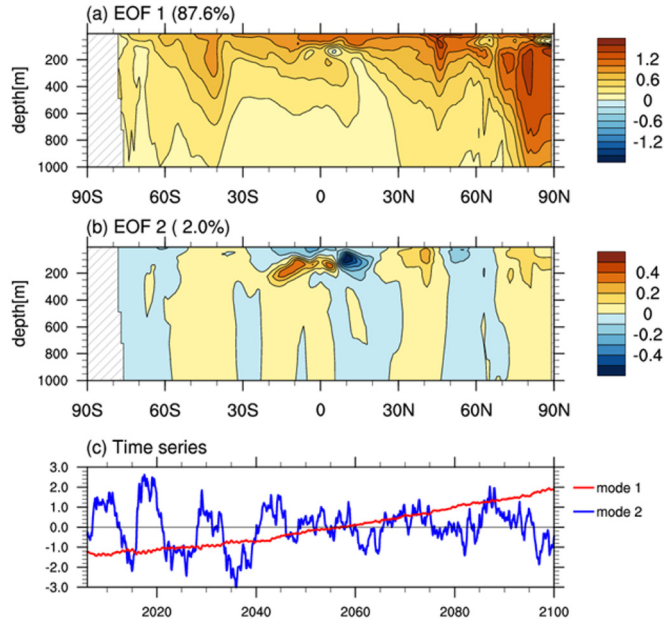


Fig. 4. The leading (a) EOF1 and (b) EOF2 patterns of the zonal averaged monthly ocean temperature from HadGEM2-AO RCP8.5. (c) Their corresponding PC time series.

받침할 수 있는 근거는 Fig. 5에서 찾을 수 있다. Fig. 5는 PC2와 함께 NINO3 인덱스, 지표 온도 시계열을 나타낸다. PC2와 나머지 시계열은 서로 상반된 변동성을 보이고 있다. 즉 PC2가 양의 값을 가질 때 이들 시계열은 음의 값을 갖는다. 또한 양의 PC2는 Fig. 2에서 추정된 온난화 멈춤 시기와 잘 일치한다(e.g., 2015-2025년 기간). 이들 결과를 근거삼아 우리는 PC2를 온난화 진행의 강약을 의미하는 시계열로 간주하고자 한다.

Fig. 5에서 주목할 만한 특징은 PC2와 NINO3 지수와의 관련성을 엿볼 수 있는 점이다. 두 시계열 간에 약간의 지연(lag)이 있지만(이에 대해서는 뒤에 언급하였다.), 서로 강한 음의 상관성을 볼 수 있다. 이것은 동태평양의 해수면 온도가 평년에 비해 낮아지는 라니냐 발생이 온난화 멈춤과 연관됨을 의미하고 있다. 사실 엔소는 열대 태평양 온도를 넘어서 전지구 기온 변화에 영향을 주고 있다. 이런 특징은 Fig. 5를 통해서도 확인할 수 있다. 관측된 지표 기온에 영향을 주는 여러 인자를 찾아 구현된 경험적 모델 분석은 라니냐 현상이 온실기체에 의한 온난화를 상쇄시켜 온난화 멈춤을 유도한다고 제시하고 있다(Lean and Rind, 2009; Foster and Rahmstorf, 2011). 기후모델을 이용한 연구에서도(비록 동태평양이 전지

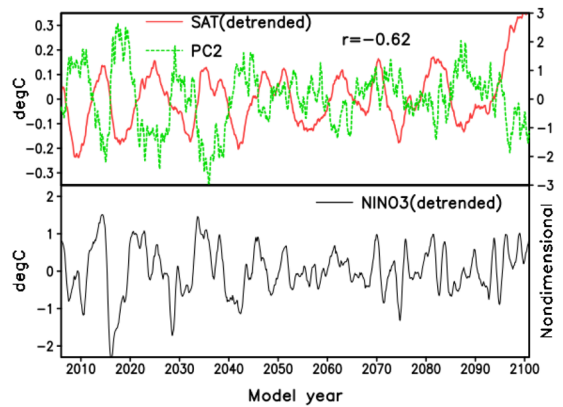


Fig. 5. Surface air temperature (trend removed) (red, left axis), along with the PC2 time series (green, right axis) from Fig. 4c. Note that they show the robust negative correlation ($r = -0.62$). Detrended NINO3 index (black) is also shown to be related to PC2.

구 표면의 8.2%만을 차지하고 있지만) 라니냐와 유사한 해수면 온도 변화를 온난화 약화의 원인으로 지목하고 있다(Kosaka and Xie, 2013). 가장 최신의 연구는 지난 20여 년간 지속적으로 강화된 태평양 무역풍의 영향으로 동태평양이 라니냐 발생에 우호적인 조건에 놓였다고 제시하였다(England et al., 2014).

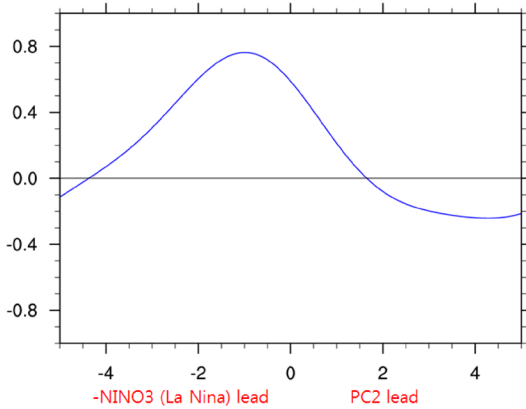


Fig. 6. Lead-lag correlation coefficients between La Niña index (defined as the negative of NINO3 index, i.e., -NINO3) and PC2. The maximum lead-lag correlation between two variables occurs at -11 months.

온난화 멈춤에 대한 여러 연구를 종합하면, 대체로 이 현상이 동태평양의 라니냐와 연관되면서 발생하는 것은 이견이 없는 것 같다. 그러나 이들 중 무엇이 원인으로 작용하는지에 관하여는 다루지 않았다. 이 연구는 위에 언급한 PC2와 NINO3 사이의 지연 상관이 있을 가능성에 주목하였다. 이때 라니냐를 고려하기 위해 NINO3에 -1을 곱하여 라니냐 발생을 나타내도록 변경하였다. Fig. 6은 라니냐 지수(즉, -NINO3)와 PC2와의 지연 상관을 나타내고 있다. 시계열을(Fig. 5) 통해 추측하였듯이, 라니냐 지수가 PC2를 약 11개월 앞서고 있다. 이것은 라니냐 발생이 온난화 멈춤을 유도한다는 가능성을 의미한다. 이것은 또한 온난화 멈춤 현상이 강제력에 의해서가 아니라, 기후시스템의 내부 변동성에 의한 것임을 말해주고 있다.

지구온난화 멈춤의 원인 분석

온난화 멈춤과 관련한 기존의 연구들은 해양의 열 흡수를 주요 원인으로 삼고 있지만(Meehl et al., 2011; Kosaka and Xie, 2013), 지구온난화 강제력에 의한 열이 해양에 흡수될 때 해양 내부의 열적 구조가 어떻게 변하는 지에 관한 연구는 드물다. 우리는 PC2에 대한 해수 온도의 지연 회귀 분석을 통해 온난화 멈춤과 동반된 해양의 열흡수 과정을 이해하려 노력하였다. Fig. 7은 지연 회귀 분석 결과를 보이고 있는데, 라니냐의 영향과 비교하기 위해 앞서 정의한

라니냐 지수에 대한 회귀 계수를 함께 나타냈다. 먼저 온난화 멈춤이 발생하면서 열대 해양(특히 남반구의 깊이 100-300 m)에 양의 온도 편차가 발달하고 있다(Fig. 7a-7c). 반면에 상층은 냉각을 보이고 있으며, 이런 변화는 Fig. 3에서 살펴본 전지구 평균한 해양의 온도 변화와 잘 일치하고 있다. 주목할 점은 열대 해수면 온도의 최솟값은 음의 지연(Fig. 7a, 7b) 시기에 나타나는 점이다. 라니냐가 열대 해수면 온도가 냉각되는 때는 가리키는 것을 고려하면, 이런 특징은 라니냐가 온난화 멈춤에 비해 앞서 발생한다는 Fig. 6의 결과와 잘 일치하고 있다. 또한 라니냐 지수에 대한 회귀 분석의 결과(Fig. 7f-7j)도 이를 뒷받침 하는데, 열대 해수면 온도가 최소가 된(Fig. 7h) 이후 점차 해양 내부의 온도가 상승하고 있다(Fig. 7i, 7j). 특히 PC2의 lag = -11 시기의 수온 분포는 (그림은 보이지 않음) 라니냐 지수의 lag = 0 (Fig. 7h)에 해당하며 이 둘은 유사한 분포를 보이고 있다. 이것은 라니냐 발생 후 열이 해양 깊숙이 전달되는 것을 의미하며, 라니냐 발생이 온난화 멈춤을 유도한다는 이 연구의 주장에 무게를 실어주고 있다.

지구온난화 멈춤 현상이 발생하면서 나타난 대기의 변화를 Fig. 8에 나타냈다. 함께 제시한 라니냐의 영향과 비교하여 주목할 만한 특징은 PC2에 대하여 북태평양의 해수면 온도와 기온 변화가 두드러지게 나타나는 점이다(Fig. 8a, 8b와 Fig. 8e, 8f 비교). 이 변화는 북태평양의 장기 변동인 Pacific Decadal Oscillation (PDO)의 음의 위상인 상태와 유사한 특징을 갖는다(Mantua et al., 1997). 이런 관련성은 최근의 연구에서도 언급되었지만(Folland et al., 2002; Power et al., 1999), 이 두 현상을 원인과 결과의 관점에서 분석하지 않았다. 지표 기온 변화에서 라니냐와 다르게 나타나는 변화는 온난화 멈춤 기간에 북반구 극지의 기온 상승이 뚜렷하다는 점이다. 이 변화는 최근 주목받고 있는 북극 온난화 강화(Arctic amplification) (Rigor et al., 2000; Johannessen et al., 2004)를 떠올리게 하는데, 온난화 멈춤과 극지의 변화와의 관련성에 대한 연구는 거의 이뤄지지 않았다. 끝으로 Fig. 8d에서 볼 수 있듯이 온난화 멈춤이 무역풍의 강화와 관련되는 것을 언급할 필요가 있다. 모델링 연구에 따르면 무역풍 강화가 지속된다면 현재 진행 중인 온난화 멈춤 현상이 당분간 지속될 가능성이 있다(England et al., 2014).

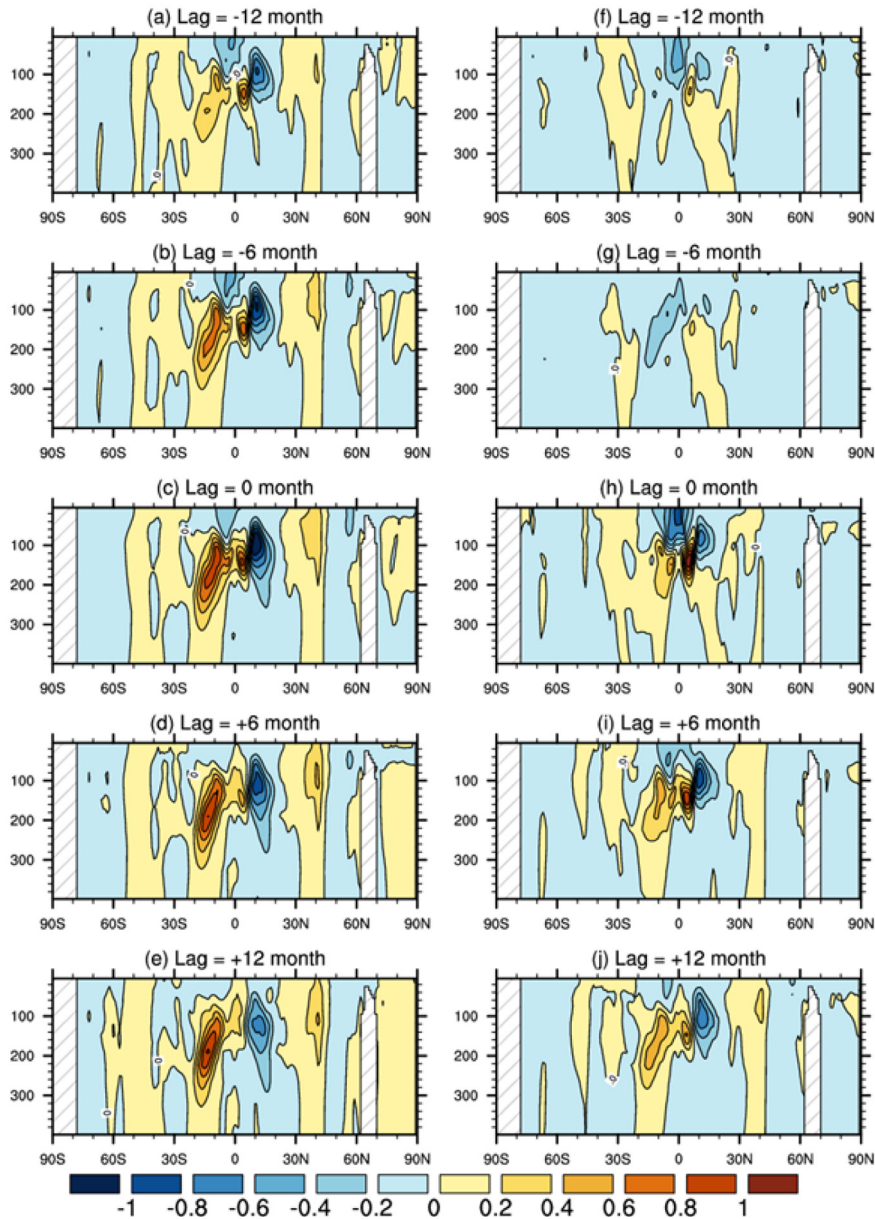


Fig. 7. Lead-lag ocean temperature anomaly patterns regressed onto the PC2 (left panel), and La Niña index (right panel). Positive lags mean PC2 and La Niña index are leading, respectively.

결론 및 토의

이 연구는 최근 약 10여 년 동안 지속되고 있는 지표 기온의 상승률 둔화 현상을 가리키는 온난화 멈춤 현상을 분석하였다. 이산화탄소를 비롯한 온실 기체가 꾸준히 대기 중으로 배출되고 있고, 이에 대하여 기후시스템이 장기적으로 가열되고 있는 상황에

서 지표 기온이 일정하게 유지되거나 오히려 감소하는 현상은 많은 관심을 끌고 있다. 보통의 경우 과거의 이해를 통해 미래를 예측하지만, 우리는 모델이 모의한 미래 기후 변화를 분석하여 현재의 온난화 멈춤을 이해하려 노력하였다. 사용된 자료는 HadGEM2-AO RCP8.5 실험을 통해 얻은 95년의 모의 결과이다. 전 지구 평균한 해수 온도 시계열을 통해 상층 해

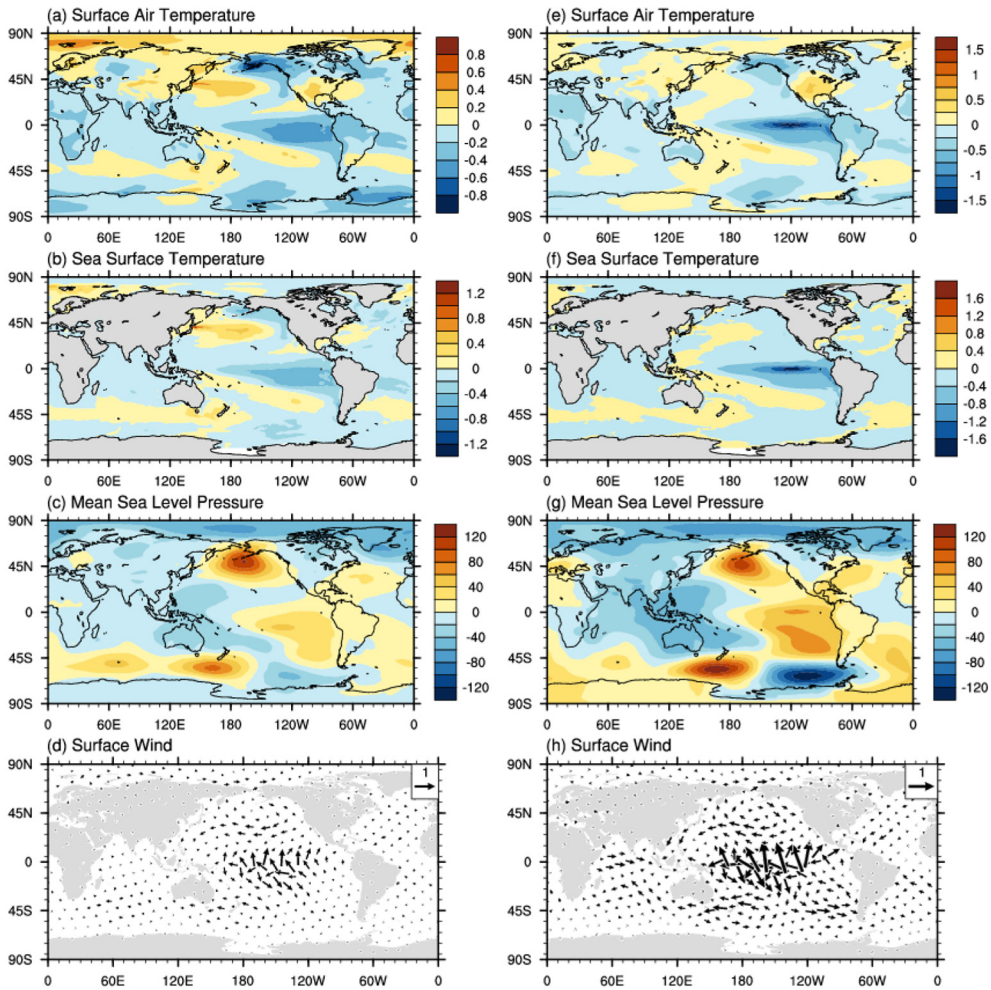


Fig. 8. Regression coefficients of (a) the surface air temperature, (b) sea surface temperature, (c) mean sea level pressure, and (d) surface wind to PC2. Right panel (e-h) are same as (a-d) except for the La Niña index.

양의 열이 하층으로 침강하면서 온난화 멈춤이 나타남을 보였다. 이것은 해양의 열흡수를 강조한 여러 연구들(Meehl et al., 2011; Kosaka and Xie, 2013)과 일치한 결과다. 기존 연구와는 다르게 우리는 동서 평균한 해양 수온 자료를 EOF 분석하여 얻은 PC2를 온난화 멈춤을 표현하는 시계열로 정의하였다. PC2의 변동은 해수면 온도, 대류권 하부의 기온 변화에서 나타나는 온난화 멈춤 시기를 잘 나타내고 있다. PC2와 라니냐 지수와의 자연 상관관계 분석에서 라니냐 지수가 PC2를 몇 개월 앞서는 것을 발견하였다. 이것은 라니냐의 발생이 온난화 멈춤을 유도할 가능성에 대한 이 연구의 주장을 뒷받침하고 있다. 또한 이것은 온난화 멈춤이 기후계가 갖는 본질적인

변동성(내부 변동성)에 의한 현상임을 말해주고 있다. PC2에 대한 해수 온도의 자연 회귀 분석을 통해 온난화 멈춤 시기에 열대지역의 열이 해양 내부로 침투하는 모습을 볼 수 있었다. 특히 해양의 열흡수는 남반구 열대지역에서 두드러졌다.

지난 50년간 기후시스템에 가해진 열의 약 90%가 해양에 흡수된 것(Trenberth, 2009; Trenberth and Fasullo, 2013)을 고려하여, 모델 분석에서 나타난 해양의 열흡수 과정을 좀 더 자세히 살펴볼 필요가 있다. 즉 해양의 열흡수가 연직 혼합과정 및 해양의 순환(풍성순환 및 열염분순환)과 어떻게 관련이 되는가에 대한 연구(Hansen et al., 2011)가 필요하다. 또한 최근의 온난화 멈춤의 원인으로 강한 무역풍이 원인

으로 제시된 것에 주목할 필요가 있다(England et al., 2014). 아직 무역풍이 강화된 원인이나 메커니즘을 제시한 연구는 거의 없다. 모델에서 온난화 멈춤이 북극 기온 상승과 함께 나타남을 고려하면(Fig. 8a), 극지의 변화와 열대의 관련성을 생각할 수 있다. 만약 무역풍의 변화의 원인이 고위도의 변화에 의한 것이라면 온난화 멈춤이 기후시스템의 내부 변동성에 기인한다는 견해를 수정할 필요가 있을 것이다.

감사의 글

논문에 귀중한 조언을 주신 이은정 박사님과 익명의 심사위원께 감사드립니다. 이 연구는 “NIMR-2012-B-2 (기후변화 예측기술 지원 및 활용연구)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Baek, H.-J., Lee, J., Lee, H.-S., Hyun, Y.-K., Cho, C., Kwon, W.-T., Marzin, C., Gan, S.-Y., Kim, M.-J., Cho, D.-H., Lee, J., Lee, J., Boo, K.-O., Kang, H.-S., and Byun, Y.-H., 2013, Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 49, 603-618, doi:10.1007/s13143-013-0053-7.
- Balmaseda, M.A., Trenberth, K.E., and Kallen, E., 2013, Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content. *Geophysical Research Letters*, 40, 1-6.
- Chang, E.-C. and Hong, S.-Y., 2011, Projected climate change scenario over East Asia by a regional spectral model. *Journal of Korean Earth Science Society*, 32, 770-783.
- Chang, S.-K., Yoon, H.I., and Chung, H., 1998, Global warming and recent retreat of an ice cliff on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. *Journal of Korean Earth Science Society*, 19, 101-106.
- Choi, Y.-S., 2011, How sensitive is the Earth climate to a runaway carbon dioxide? *Journal of Korean Earth Science Society*, 32, 239-247.
- Collins, W.J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C.D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., and Woodward, S., 2011, Development and evaluation of an Earth-system model HadGEM2. *Geoscientific Model Development Discussions*, 4, 997-1062.
- Easterling, D.R. and Wehner, M.F., 2009, Is the climate warming or cooling? *Geophysical Research Letters*, 36, L08706, doi:10.1029/2009GL037810.
- England, M.H., McGregor, S., Spence, P., Meehl, G.A., Timmermann, A., Cai, W., Gupta, A.S., MaPhaden, M.J., Purich, A., and Santoso, A., 2014, Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change*, 4, 222-227.
- Etheridge, D.M., Steele, L.P., Langenfelds, R.L., Francey, R.J., Barnola, J.M., and Morgan, V.I., 1996, Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 101, 4115-4128.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., and Rummukainen, M., 2013, Evaluation of climate models. in *climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 126 p.
- Folland, C.K., Renwick, J.A., Salinger, M.J., and Mullan, A.B., 2002, Relative influences of the Interdecadal Pacific Oscillation and ENSO on the South Pacific Convergence Zone. *Geophysical Research Letters*, 29, 211-214.
- Foster, G. and Rahmstorf, S., 2011, Global temperature evolution 1979-2010. *Environmental Research Letters*, 6, 044022, doi:10.1088/1748-9326/6/4/044022.
- Fröhlich, C., 2012, Total solar irradiance observations. *Surveys in Geophysics*, 33, 453-473, doi: 10.1007/s10712-011-9168-5.
- Hannachi, A., Jolliffe, I.T., and Stephenson, D.B., 2007, Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology*, 27, 1119-1152.
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., and von Schuckmann, K., 2011, Earth's energy imbalance and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 13421-13449.
- Held, I.M., 2013, The cause of the pause. *Nature*, 501, 318-319.
- IPCC, 2013, Summary for policymakers. in *climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 27 p.
- Johannessen, O.M., Bengtsson, L., Miles, M.W., Kuzmina, S.I., Semenov, V.A., Alekseev, G.V., Nagurnyi, A.P., Zakharov, V.F., Bobylev, L.P., Pettersson, L.H., Hasselmann, K., and Cattle, H.P., 2004, Arctic climate change: Observed and modeled temperature and sea-ice variability. *Tellus*, 56A, 328-341.
- Kaufmann, R.K., Kauppi, H., Mann, M.L., and Stock, J.H., 2011, Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998-2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 11790-11793.

- Kosaka, Y. and Xie, S.-P., 2013, Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 501, 403-407, doi:10.1038/nature12534.
- Lean, J.L. and Rind, D.H., 2009, How will Earth's surface temperature change in future decades? *Geophysical Research Letters*, 36, L15708, doi:10.1029/2009GL038932.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., and Francis, R.C., 1997, A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1069-1079.
- Martin, G.M., Bellouin, N., Collins, W.J., Culverwell, I.D., Halloran, P.R., Hardiman, S.C., Hinton, J., Jones, C.D., McDonald, R.E., McLaren, A.J., O'Connor, F.M., Roberts, M.J., Rodriguez, J.M., Woodward, S., Best, M.J., Brooks, M.E., Brown, A.R., Butchart, N., Dearden, C., Derbyshire, S.H., Dharssi, I., Doutriaux-Boucher, M., Edwards, J.M., Falloon, P.D., Gedney, N., Gray, L.J., Hewitt, H.T., Hobson, M., Huddleston, M.R., Hughes, J., Ineson, S., Ingram, W.J., James, P.M., Johns, T.C., Johnson, C.E., Jones, A., Jones, C.P., Joshi, M.M., Keen, A.B., Liddicoat, S., Lock, A.P., Maidens, A.V., Manners, J.C., Milton, S.F., Rael, J.G.L., Ridley, J.K., Sellar, A., Senior, C.A., Totterdell, I.J., Verhoef, A., Vidale, P.L., and Wiltshire, A., 2011, The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4, 723-757.
- Meehl, G.A., Arblaster, J.M., Fasullo, J.T., Hu, A., and Trenberth, K.E., 2011, Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nature Climate Change*, 1, 360-364, doi:10.1038/nclimate1229.
- Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., and Taylor, K.E., 2007, The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1383-1394.
- Nakicenovic, N. and Swart, R., 2000, Special report on emissions scenarios. A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 612 p.
- Peterson, T.C., Hoerling, M.P., Stott, P.A., and Herring, S., 2013, Explaining extreme events of 2012 from a climate perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, S1-S74, doi:10.1175/Bams-D-13-00085.1.
- Power, S., Casey, T., Folland, C., Colman, A., and Mehta, V., 1999, Interdecadal modulation of the impact of ENSO on Australia. *Climate Dynamics*, 15, 319-324.
- Rahmstorf, S., 2002, Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature*, 419, 207-214.
- Rigor, I.G., Colony, R.L., and Martin, S., 2000, Variations in surface air temperature observations in the Arctic, 1979-97. *Journal of Climate*, 13, 896-914.
- Solomon, S., Rosenlof, K.H., Portmann, R.W., Daniel, J.S., Davis, S.M., Sanford, T.J., and Plattner, G.-K., 2010, Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming. *Science*, 327, 1219-1223, doi:10.1126/science.1182488.
- Solomon, S., Daniel, J.S., Neely, R.R., Vernier, J.P., Dutton, E.G., and Thomason, L.W., 2011, The persistently variable 'background' stratospheric aerosol layer and global climate change. *Science*, 333, 866-870.
- Trenberth, K.E., 2009, An imperative for climate change planning: Tracking Earth's global energy. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1, 19-27.
- Trenberth, K.E. and Fasullo, J.T., 2013, An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, 1, 19-32.
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., and Rose, S.K., 2011, The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109, 5-31.
- Watanabe, M., Kamae, Y., Yoshimori, M., Oka, A., Sato, M., Ishii, M., Mochizuki, T., and Kimoto, M., 2013, Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus. *Geophysical Research Letters*, 40, 3175-2179.

Manuscript received: July 8, 2014

Revised manuscript received: July 28, 2014

Manuscript accepted: August 14, 2014