

---

# Recent Global-warming Hiatus associated with the Pacific Decadal Oscillation

---

2019 Summer Internship Program  
Climate Change Research Lab, POSTECH  
Professor. Seung-Ki Min

Seo-Young Jo

## Abstract

2000년대에 발생한 전지구 평균온도 증가율 감소(Global-warming hiatus)는 1970년대 이후로, CO<sub>2</sub>를 포함한 온실가스의 누적배출량이 계속적으로 증가하고 있음에도 불구하고 나타났다. 이것은 전구의 지표 기온이, 인위적인 배출에 의한 지구온난화에 의해서 절대적으로 영향을 받기보다는 여러가지 외부·내부 변동성이 크게 영향을 미친다는 점을 시사한다. 본 분석에서는 이러한 자연적인 기후 변동성 중의 하나로 Pacific Decadal Oscillation(PDO)이 최근의 global-warming hiatus에 미친 영향을 파악하고 그것의 지역적인 분포와 계절적인 측면을 비교하여 살펴려고 한다.

**Keywords** Global-warming hiatus · Pacific Decadal Oscillation · Cold PDO · Climate natural variability · Temperature · Extreme temperature

## Introduction

대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 증가에 따라 지표의 총 복사 강제력은 지속적으로 증가해, 지표의 온도를 상승시켰다.<sup>1</sup> 그 결과 2000년대의 평균지표온도는 관측이 시작된 이래 가장 온난한 수준에 도달했고, 감축을 위한 많은 노력에도 CO<sub>2</sub>를 포함한 전지구의 온실가스 배출량은 여전히 증가하는 추세이다.<sup>2</sup> 그러나 오히려 전 지구 평균온도의 증가율은 2000년대에 들어서면서 감소하거나 변화가 없는 경향을 보인다. 이는 인위적인 지구온난화와 함께 자연적인 기후 변동성이 2000년대 초반에 강하게 작용했음을 의미한다. 기후변화에 대한 이해도를 높이기 위해서는 이러한 기후 변동성에 대한 향상된 이해가 필요하다. 본 보고서는 이러한 측면에서 2000년대 초반에 발생한 Global-warming Hiatus의 지역적 분포와 PDO(Pacific Decadal Oscillation)와의 연관성에 대해서 분석하였다.

PDO는 태평양에서 발생하는 수십년 주기 진동으로 Positive phase와 Negative phase의 상태로 나뉘는데, Positive phase일 때는 북태평양의 중앙부와 서부에서 해수면 온도의 아노말리가 낮

---

<sup>1</sup> IPCC Climate change 2013 report, 2013

<sup>2</sup> J. G.H. Olivier et al, Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions, 2018

아지며 북태평양의 동부는 북아메리카의 서쪽 해안을 따라 해수면 온도의 아노말리가 높아진다. 또한 열대 태평양의 중앙부와 동부에 걸쳐서도 높은 아노말리 양상을 보인다. Negative phase는 그와 반대의 온도 경향을 보이며, 이와 같은 해수온도 패턴은 ENSO(El Niño-Southern Oscillation)의 해수온도 변동 패턴과 비슷하지만 시간규모에 있어서는 확연한 차이를 보인다: ENSO는 경년 주기의 변동인 반면 PDO는 수십년 주기의 변동성을 가지고 있다.<sup>3</sup>

최근의 지구온난화 중단현상이 나타나는 주요 지역은 대부분 태평양의 중앙부와 동부(즉, Negative PDO phase 패턴)와 북반구의 대륙(특히 유라시아 지역)으로 알려져 있다.<sup>4</sup> (Cohen, J. L. et al, 2012) 원인에 대해서는 태양 조도 변화, 화산 폭발로 인한 성층권과 지역적인 오염물질 배출로 인한 대류권의 에어로졸 변화의 부분적인 역할이 있겠지만, 대부분 내부 기후 변동성과 연관 지어 설명될 수 있다. (Trenberth et al, 2014) 그 중에서도 최근의 Hiatus 현상에는 PDO가 주요 역할을 한 것으로 밝혀졌다. (Trenberth et al, 2014 and England, M et al, 2014) 1976년 이전에 PDO가 음의 양상을 보였지만 1976년부터 1998년까지는 양의 양상으로 바뀌었고 이 기간동안 전 지구 평균 지표온도의 증가 추세 경향과 일치했다. 반면 1999년부터 약 14년 동안에는 PDO의 negative와 같은 해수온도 패턴이 나타났고 이는 최근의 Global-warming Hiatus가 나타난 시기와 일치한다. 또한, 한 연구에서는 북반구의 겨울(NDJFM)과 여름(MJJAS) 시즌으로 나누어 위 현상의 계절성을 파악해 본 결과, 태평양의 냉각은 북반구의 겨울철에 더욱 강하게 나타난 것으로 밝혀졌다. (Trenberth et al, 2014 and Yu Kosaka & Shang-Ping Xie, 2013)

PDO와 연관된 해양 온도의 변화는 명백하지만, 지표의 기온변화에 영향을 주는 매커니즘은 명확하게 밝혀진 바는 없다. 단지 PDO와 관련된 대기 순환 패턴 등 내부 변동성 요소가 유라시아 등 육지의 지표 온도 냉각에 중요한 역할을 했다고 밝혀져 있다. (Trenberth et al, 2014 and 2013) 본 보고서에서는 지표의 온도 경향 패턴에 초점을 맞춰, PDO의 phase에 따라 Hiatus가 발생한 지역적인 분포와 계절적인 특징을 연관 지어 분석하고자 한다.

---

<sup>3</sup> NCAR, Pacific Decadal Oscillation (PDO): definition and indices, (2016)

<sup>4</sup> Judah L. Cohen et al. Asymmetric seasonal temperature trends (2012)

## Data and Methods

1. 본 분석에 사용된 기온자료는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 ESRL(Earth System Research Laboratory)에서 제공하는 재분석자료를 이용하였다. six-hourly 와 four-dimensional로 재구성된 '20<sup>th</sup> Century Reanalysis (V2c) (1851-2014) dataset'의 1901-2014 기간 Daily Mean 자료를 이용하였다.
2. 해수면 온도 자료는 NOAA ESRL의 Gridded Climate Dataset에 있는 NOAA Extended Reconstructed SST V3b 중에서 Monthly values for 1854/01 – present. 제공자료를 이용하였다.
3. PDO의 phase를 구분할 때 쓰인 index자료는 Global mean SST를 제거한 북태평양의 SST 아노말리 값을 11년 이동평균(11-year running average)하여 계산된 PDO index를 선행연구와 동일하게 정의하여 사용하였다.

Warm PDO	Cold PDO
1903, 1904, 1905, 1906, 1909, 1910, 1911, 1912, 1924, 1925, 1926, 1931, 1934, 1939, 1949, 1940, 1941, 1942, 1943, 1983, 1984, 1985, 1987, 1989, 1992, 1995, 1998, 1999, 2000, 2001, 2003	1914, 1915, 1917, 1918, 1919, 1950, 1951, 1955, 1956, 1958, 1964, 1965, 1966, 1969, 1971, 1973, 1976, 1977, 1978, 1995, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012

Table 1. PDO phase 구분 (Warm/Cold)

4. 자료의 분석기간은 Linear trend의 경우 Global-warming Hiatus가 강하게 발생한 최근의 기간(1999-2012)과 지구온난화의 추세가 가파르게 증가하기 시작한 1970년대(1976년)를 기준으로 하여 분석에 이용하였다. 그 외 PDO와 관련된 기온자료 분석기간은 PDO가 수십년의 진동주기를 가진 변동성이므로, 보다 장기간의 분석자료를 이용하기 위해 1901-2014년의 기간을 분석에 이용하였다.
5. 분석한 공간적 범위는 주로 전구(180°W-180°E, 90°S-90°N)를 대상으로 하였으나, 부분적으로는 북태평양/북반구를 대상으로 분석하였다.
6. Data를 분석하는 데에 사용한 프로그램으로는 CDO(Climate Data Operator), R Programming을 통해 분석자료를 계산하였고, 결과의 표출은 GrADS(Grid Analysis and Display System)를 이용하여 나타내었다.

## Result and Discussion

- Recent Global-warming Hiatus

최근 온도상승의 추세 변화를 보기 위하여 연평균과 겨울철 평균의 아노말리(기준 년도 1976-2012)에 대한 시계열을 나타내고 평균적인 상승 추세와 최근의 기온 변화 추세를 비교하기 위해 각 기간의 linear trend를 분석하였다(Figure1). 전체 기간은 지구온난화가 가속화되기 시작한 시점인 1970년대(1976년) 부터 Hiatus의 경향이 보인 2012년까지로 설정했고 선행연구를 따라 최근기간(즉, global-warming hiatus가 나타난 기간이자 PDO의 index값이 negative를 보인 기간)은 1999년부터 2012년까지로 정의했다. Figure1에 보이는 바와 같이, 기온은 지속적으로 상승 추세를 보이고 있지만 이를 최근 기간의 상승 추세를 보면 평균적인 상승폭보다 전반적으로 감소하였다. 특히 겨울철의 경우 연평균의 감소폭보다 더 크게 온난화 추세가 감소하는 경향이 나타난다. 전구에 비해 북반구의 평균적인 온도변화 폭이 크지만 최근기간에는 이 역시 거의 변화가 없거나 감소하는 추세이다. 좀 더 구체적으로 나타내기 위해서 최근기간(1999-2012)의 기온 선형추세와

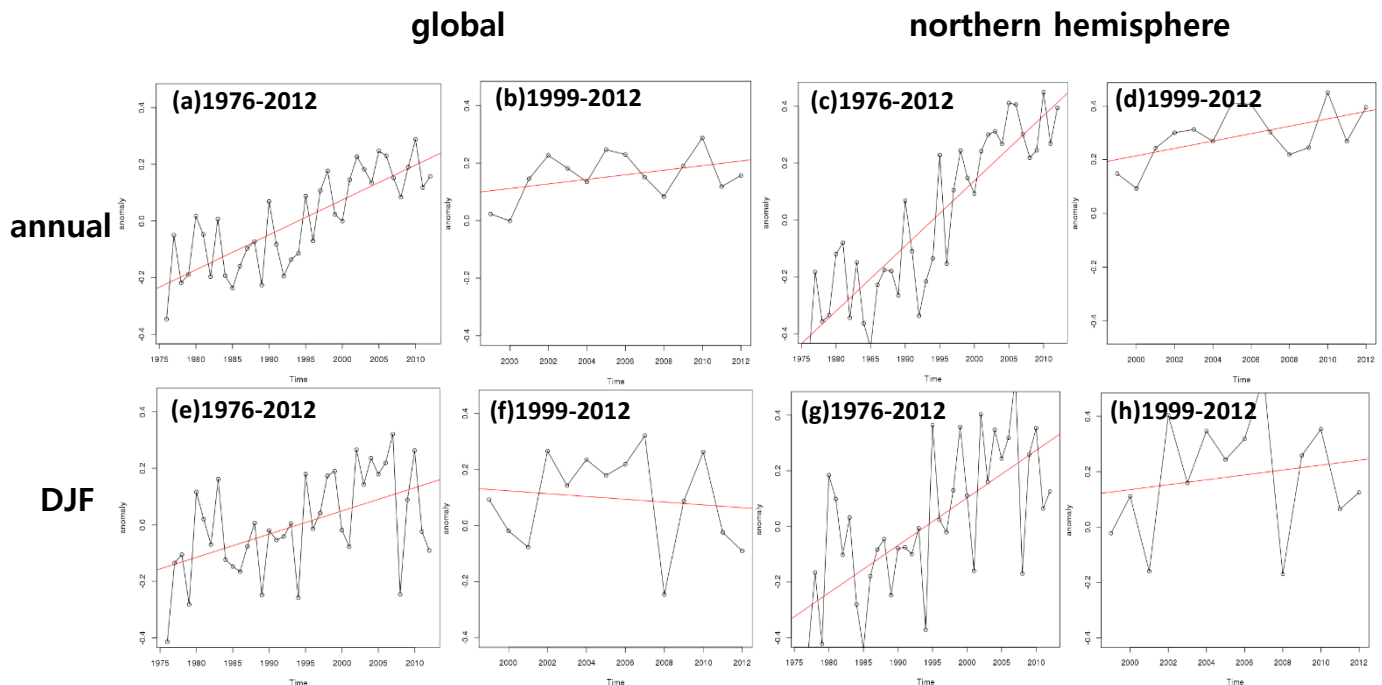
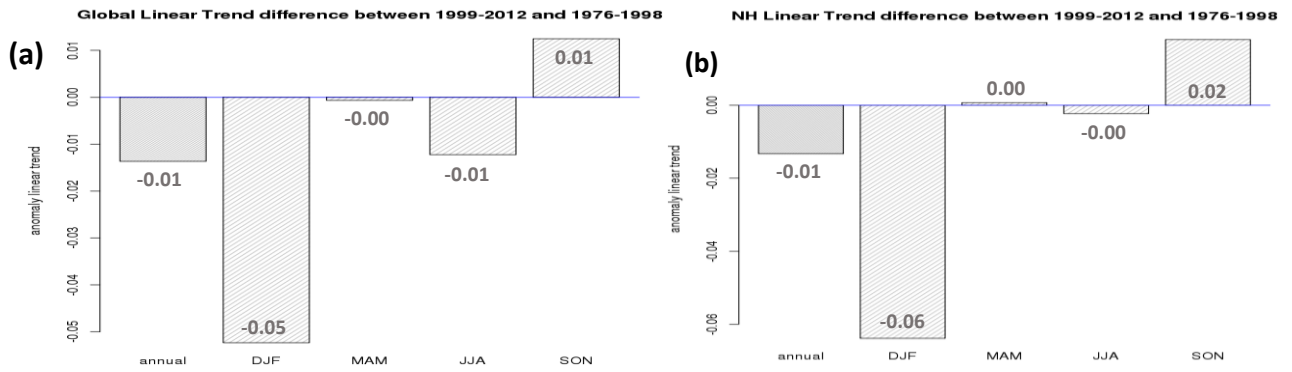
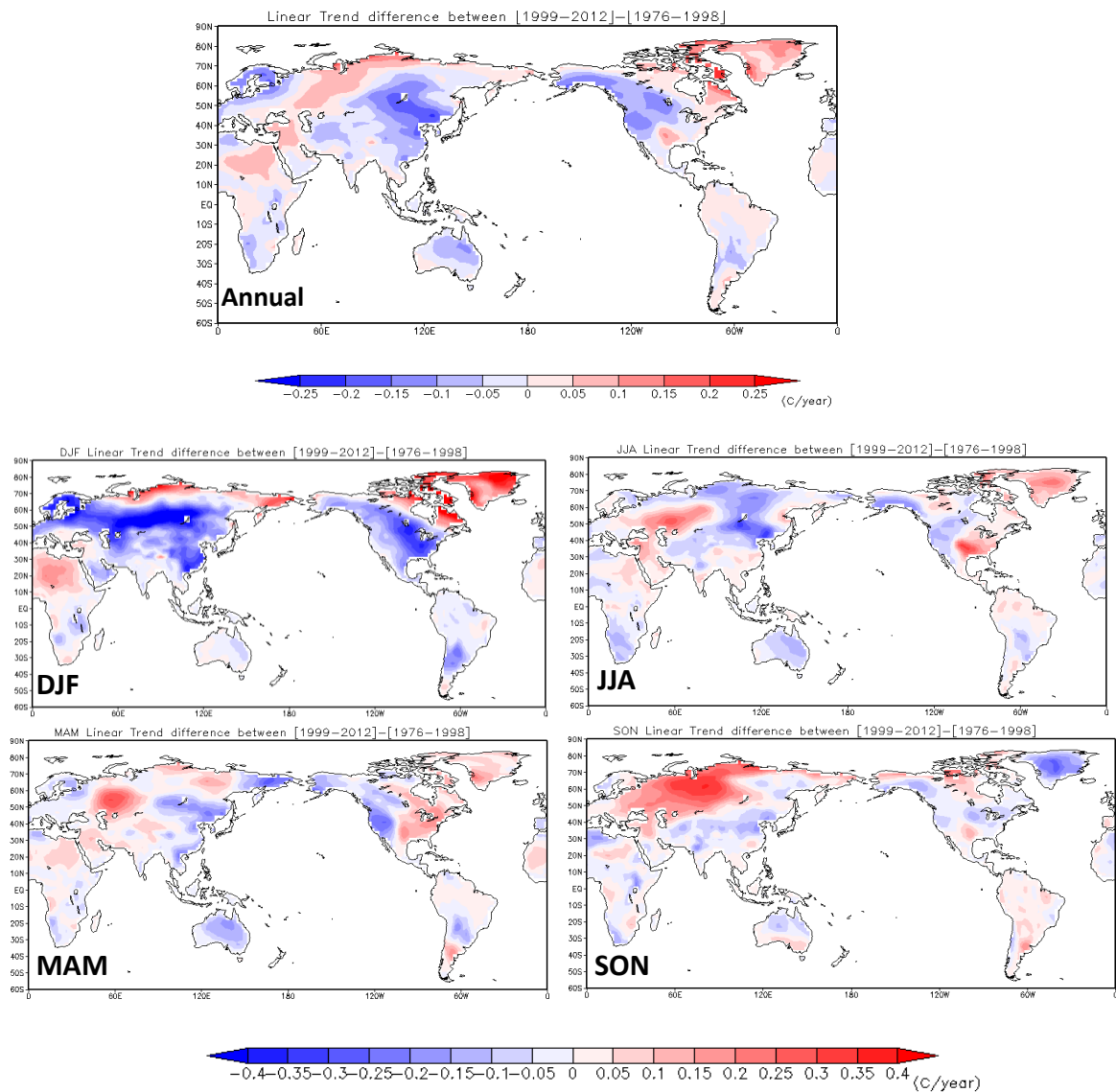


Figure1. Temperature anomaly linear trend over global(a),(b),(e),(f) and northern hemisphere(c),(d),(g),(h) for annual(a),(b),(c),(d) and winter(e),(f),(g),(h).



**Figure2. Linear trend differences between 1999-2012 and 1976-1998. (a) is for Global and (b) is for northern hemisphere. differences calculated by subtract past period from recent peiord [(1999-2012) – (1976-1998)]**



**Figure3. Linear trend difference distribution pattern for annual and seasons**

과거기간(1976-1998)의 선형추세의 차이를 계산하였다(**Figure2**). 그 결과, 전 지구와 북반구 모두 연평균 기온의 증가율이 과거에 비해 최근 들어 감소하였다는 것을 확인할 수 있었다. 계절적으로는 다른 계절에 비해 겨울철에서 이러한 감소 경향이 가장 뚜렷하게 나타난다. 한편 봄의 평균기온은 변화가 없는 것으로 판단되고, 여름은 전구적으로 봤을 때만 이러한 경향이 나타난다. 가을은 전 지구와 북반구 모두에서 최근에 오히려 기온의 상승폭이 커졌음을 알 수 있다. 이러한 최근의 온도변화 경향의 지역적인 분포패턴을 보면(**Figure3**) 평균적으로 Hiatus의 경향이 뚜렷하게 나타난 지역은 북아메리카 대륙의 서쪽지역과 유라시아 대륙의 북동부지역에 해당하는 것을 알 수 있다. 또한 Figure2에서도 확인할 수 있었던 겨울철에 linear trend의 감소가 가장 강력하게 나타나며 북아메리카 대륙의 북동부를 제외한 지역과 시베리아를 포함한 유라시아 대륙에 전반적으로 나타나는 현상임을 확인할 수 있다. 반면 여름철과 봄철에는 뚜렷한 패턴의 변화 없이, 북미 서부와 아시아의 북동부에서만 약하게 감소 현상이 나타났고 가을철 평균기온은 오히려 유라시아 북서부에서 강하게 상승하는 경향을 보였다. **Figure2**와 **Figure3**을 통해 최근의 Global-warming hiatus 현상이 지역적으로는 북반구 위주로, 계절적으로는 특히 겨울철에 강력하게 발생한 현상임을 알 수 있다.

#### • Changes in Temperature associated with Pacific Decadal Oscillation

이러한 hiatus 현상과 PDO의 연관성에 대하여 논하기 이전에, PDO의 양상에 따라 지표기온이 어떻게 변화하는지 알아보려고 한다. **Figure4**는 PDO가 발생하는 지역인 태평양에서의 SST 아노말리를 나타낸 것인데, 좌측 상단은 1901-2014년 기간 동안의 Cold PDO phase일 때 SST를 composite하여 나타낸 것이고, 우측 상단은 Warm PDO를 composite하여 나타낸 것이다. 알려진 바와 같이, Cold PDO(negative phase)일 때는 북태평양의 중앙부와 서부에서 양의 아노말리가 나타나고, 북아메리카 서부의 해안가를 따라 태평양의 동부에서는 음의 아노말리가 나타난다. 또한 본 연구에서 설정한 최근기간(최근 global-warming hiatus가 발생한 기간이자 PDO index가 negative phase인 기간, 1999-2012)에는 SST의 온도 패턴이 평년보다 강력한 cold PDO의 양상을 띄는 것을 확인할 수 있다. PDO의 음의 양상에 따라 **Figure5**에서는 계절별 지표온도의 변화를

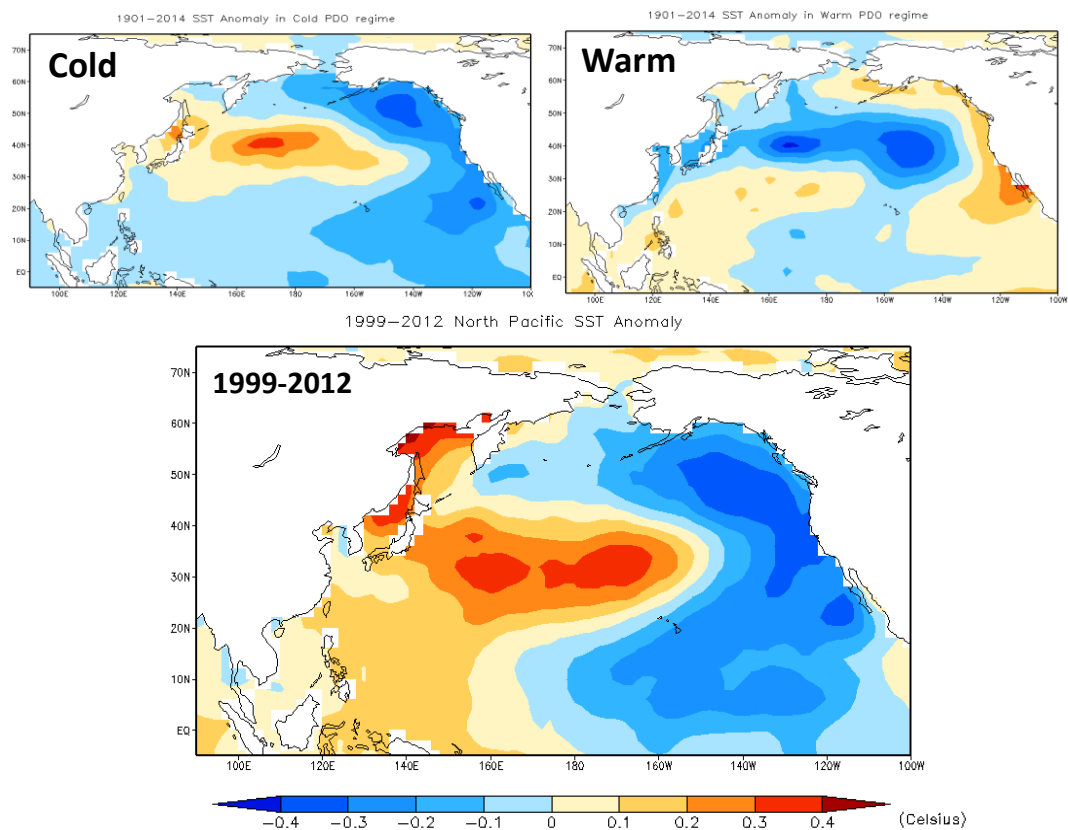


Figure4. SST anomaly in Pacific basin and recent phase

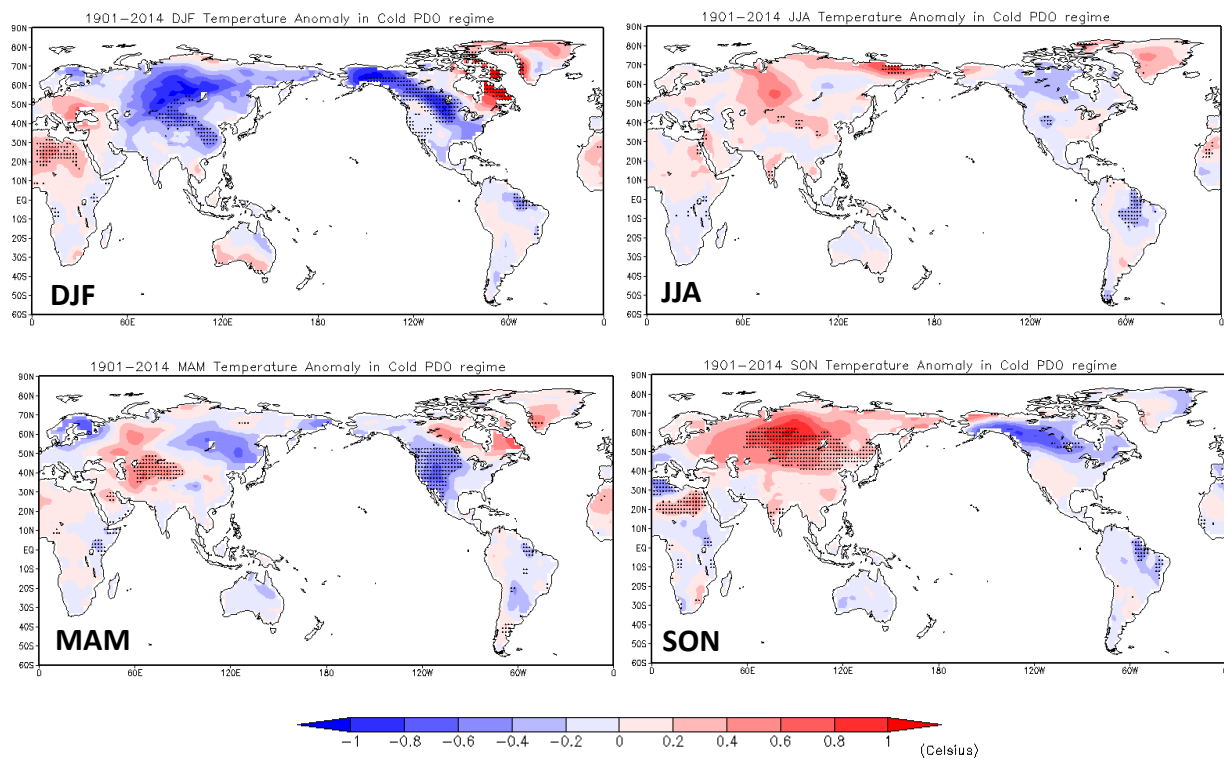


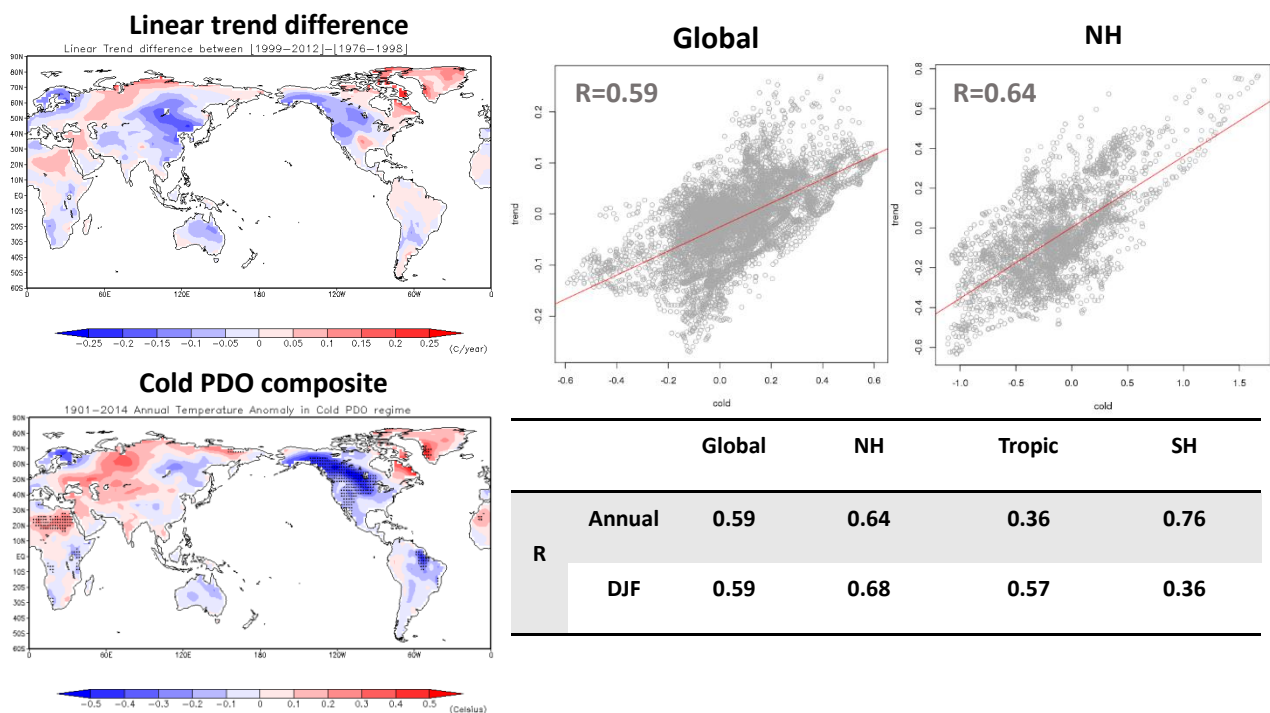
Figure5. Surface temperature anomaly in Cold PDO regime and its significance(dots)



나타낸 것이며 Figure5의 검은색 점은 warm PDO와 cold PDO의 차이가 유의한 지점을 나타낸다. 겨울철 지표온도 변화를 보면 북아메리카의 서부지역과 유라시아 대륙의 아시아지역에서 cooling 되는 현상을 발견할 수 있다. 여름에는 미미하게 변화가 발견되지만, 유의한 수준의 지역은 없는 것으로 판단되고 봄철에는 미국의 서부 지역에서만 cooling 되는 현상이, 그리고 가을철에는 유라시아 지역으로 넓게 warming 되는 현상을 발견할 수 있었다. 이는 전반적인 패턴이 Figure3에 보인 최근의 선형추세 감소 패턴과 비슷하게 나타난다. 따라서 위 결과를 통해 최근에 발생한 PDO의 음의 양상이 지구온난화 상승추세의 중단 현상과 연관이 있다고 유추해볼 수 있다.

- **Correlation between Hiatus and cold PDO phase**

최근(1999-2012)의 선형추세의 변화에 대한 공간분포 패턴과 Cold PDO 양상에서의 기온변화에 대한 공간분포 패턴의 지역분포 관계를 보다 명확하게 이해하기 위하여 공간상관분석(Spatial Correlation Analysis)를 실시하였다. 연평균 기온의 아노말리를 분석한 결과 전구적인 스케일에

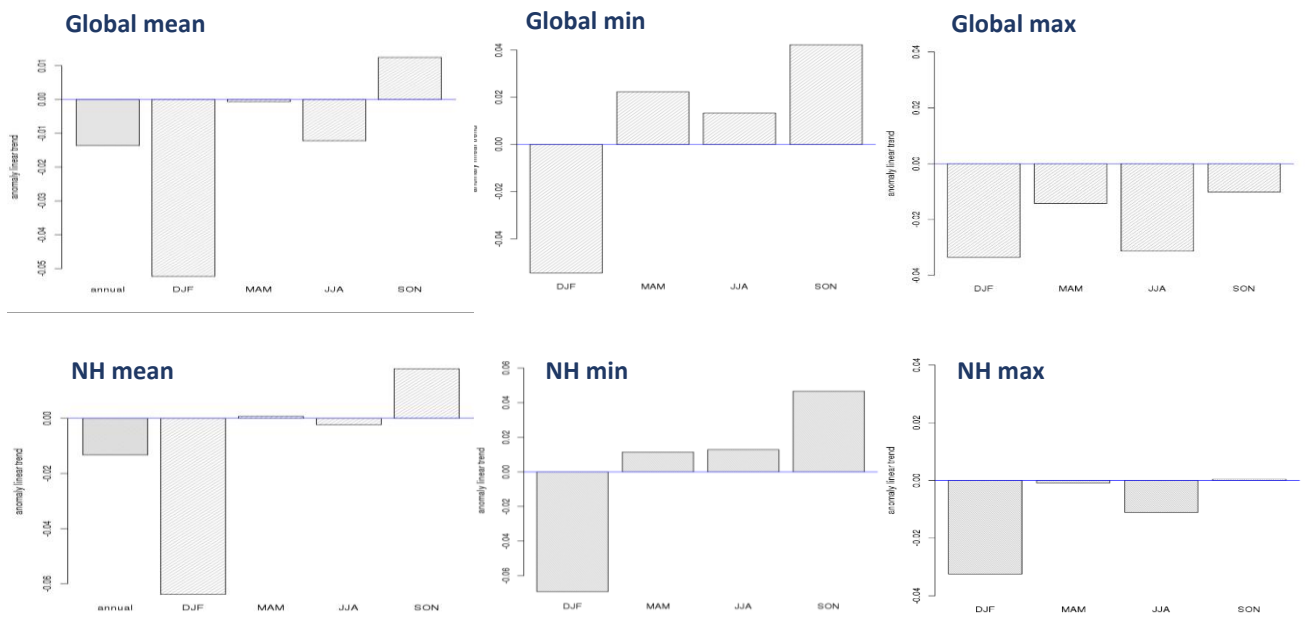


**Figure6. Spatial correlation analysis between recent linear trend and temperature anomaly in Cold PDO regime**

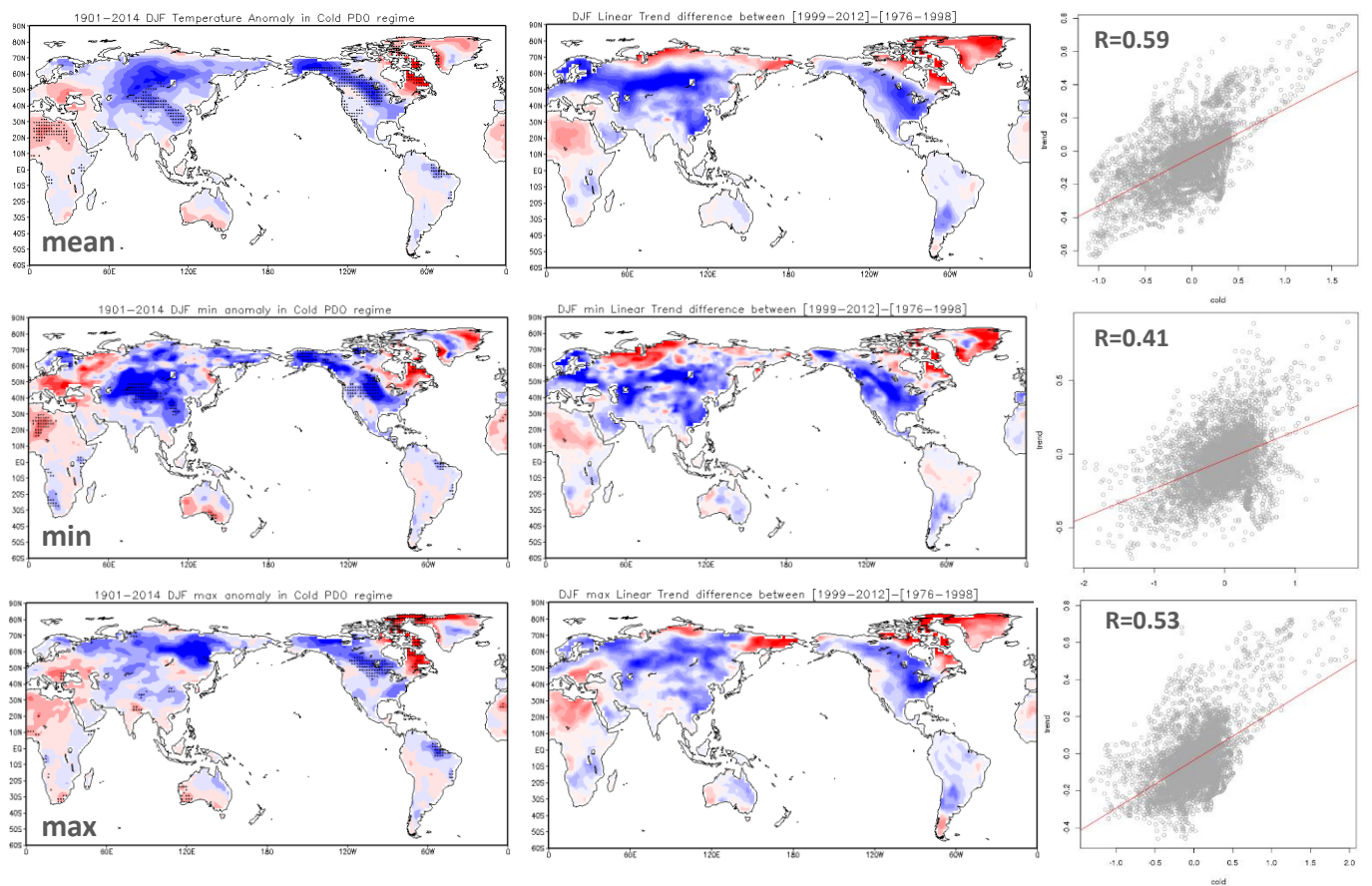
대한 상관계수는  $R=0.59$ 로 설명되어 지고, 이는 겨울철에도 비슷한 수치를 갖는다. 하지만 북반구를 따로 분석한 경우 연평균의 경우 상관계수가  $R=0.64$ 로 공간적인 상관성이 더 높아 보이며, 북반구의 경우 겨울철에 상관성이 더 높게 나타난다. ( $R=0.68$ ) 이는 **Figure2**에서 보여지는 최근 linear trend의 변화와 비슷한 결과임을 알 수 있다. 열대지방과 남반구는 상관계수가 균일하지 않고 비교적 낮은 수치를 보인다. 따라서 남반구와 열대지역에 대해서는 공간패턴의 분포 사이에 관련성이 낮은 것으로 판단된다. (**Figure6**.)

- **Extreme temperature changes with cold PDO phase**

위의 자료들은 모두 일평균 기온자료를 연평균(for annual) 또는 월평균(for DJF,JJA,MAM,SON)하여 분석한 것이다. 그러나 이러한 현상이 평균적인 기온에만 국한된 것인지, 아니면 이러한 패턴과 관련성이 극한기온에도 나타날지에 대한 분석을 실시하기 위하여 월최저기온을 계절별로 평균하여 계절최저(min)와 계절최고(max)기온을 각각 산출하였다. **Figure7**은 평균기온과 월극한기온의 계절별 평균의 최근 선형추세의 변화를 나타내는 그래프이다. 최저기온은 겨울철의 선형추세 감소와 가을철의 증가가 평균기온과 비슷한 양상을 보였으며, JJA와 SON에서는 평균기온, 최고기온과 다르게 최저기온에서만 증가추세를 보였다. 또한 월최고기온의 계절적인 경향을 보면 연평균과 최저기온과 마찬가지로 겨울철에 가장 강력한 감소 경향을 보였지만, 평균과 최저기온에 비해서는 그 정도가 약하다는 것을 알 수 있다. 또한 주목할 만한 점은 다른 계절에서도 모두 감소 경향이 나타났다는 것이다. **Figure8**은 가장 영향이 뚜렷하게 나타나는 겨울철의 Cold PDO 양상에서의 기온 아노말리와 최근의 선형추세의 변화 패턴을 공간상관분석한 것이다. 결과를 보면 평균기온에서 가장 높은 상관성이 나타났으며 최고기온은 분포패턴의 상관성이 평균과 비슷하지만 최저기온의 경우 나머지 두 케이스에 비하여 낮은 상관성을 보인다. 그러나 공간상관분석은 단순히 공간적인 분포패턴의 상관성에 초점을 맞춘 분석기법이라서 그 정도에 대해서는 유의미한 분석을 하기가 어렵다.



**Figure7. temperature anomaly linear trend difference between recent and past for mean, min and max temperature.**



**Figure8. spatial correlation between DJF temperature anomaly in Cold regime and DJF temperature anomaly linear trend difference**

## Conclusion

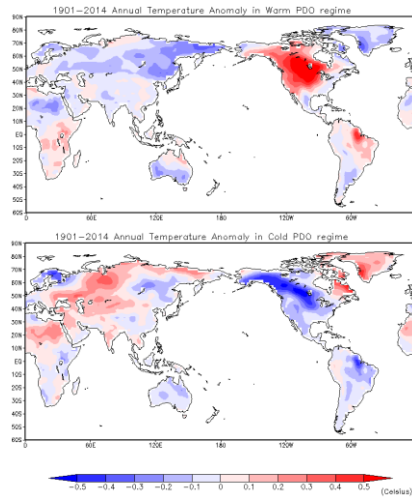
최근의 Global-warming hiatus 현상으로 인하여 지구온난화 및 기후변화 양상이 크게 달라진 것은 아니지만, 기온이 올라가는 추세에 감소 (또는 중단)으로 인하여 장기적인 지구온난화 파악에 있어서 과소평가를 불러일으킬 수 있다. 따라서 우리는 인위적 배출로 인한 온난화와 함께, PDO와 같은 자연적인 내부 변동성의 영향도 함께 고려해야 기후변화에 대한 더 나은 이해와 전망을 제시할 수 있다. 그러한 일환으로, 본 분석은 Pacific Decadal Oscillation이 전구의 지표온도에 어떤 영향을 주는지를 알아보고 더 나아가서는 최근 발생한 Hiatus와는 어떤 관련성이 있는지를 지역적, 계절적인 측면에서 분석하였다.

본 분석을 통하여 다음과 같은 결과를 말 할 수 있다.

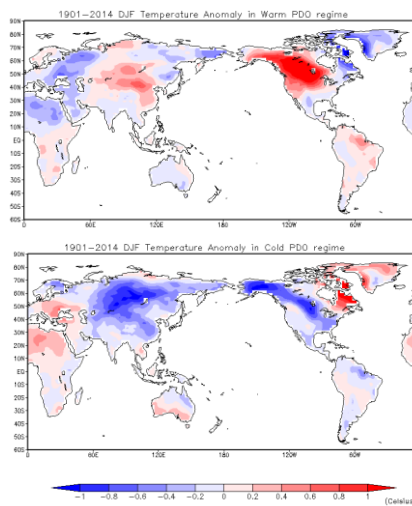
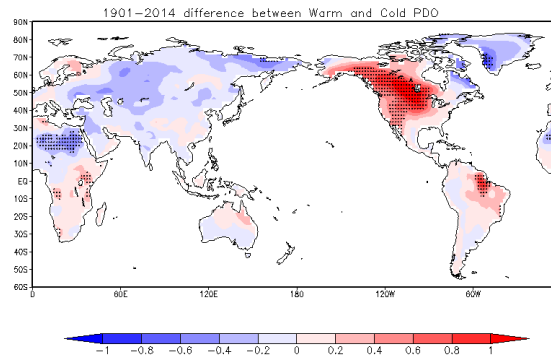
- Global-warming Hiatus 현상은 최근(1999-2012) PDO가 Cold phase를 보인 시기에 실제로 기온의 상승률이 줄어들거나, 겨울철 같은 경우에는 심지어 하강하는 추세로 나타났다.
- 지역적으로는 Hiatus의 경향이 유라시아 대륙과 북아메리카 대륙의 서부에서 가장 강하게 일어나며 Cold PDO의 경우에도 마찬가지로 두 지역에서 유의한 수준으로 시그널이 발견되었다.
- 계절적으로는 북반구의 겨울철에 최근의 선형추세가 그 전과 비교했을 때 눈에 띄게 감소하여 나타났고 Cold PDO에서도 겨울철에 cooling되는 현상이 가장 강하게, 유의미한 수준으로 나타났다.
- 이것은 전구적인 상관정보다는 지역적인, 특히 북반구의 대륙과 상관성이 높은 것으로 보여지고, 극한기온(min,max)보다는 평균기온에서 더 강한 상관관계를 갖는다.

위와 같이, 본 연구에서는 global hiatus에 영향을 줬다는 점을 단순히 두 현상 간의 공간분포에 대한 해석과 상관성을 위주로 정의하였다는 것이다. 따라서 다른 내부 변동성의 영향을 고려하지 못했다는 것과 정확한 물리적인 과정에 대한 부재가 본 분석의 한계점이다.

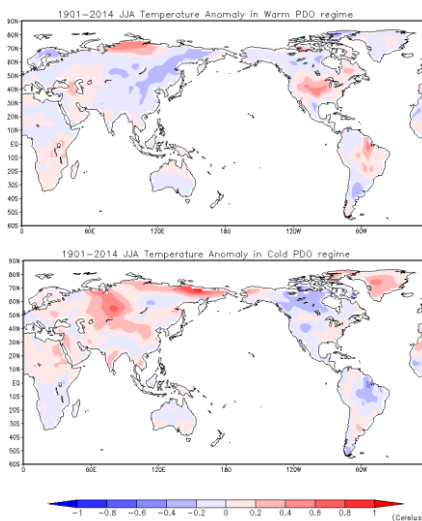
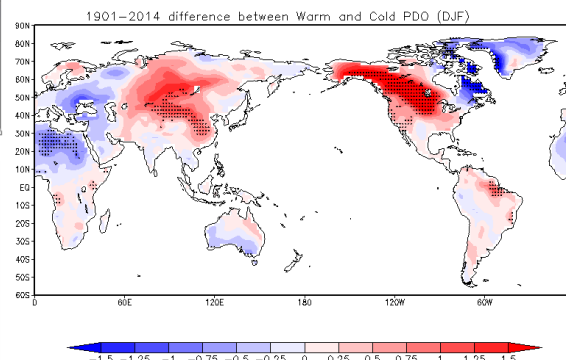
## Supplementary



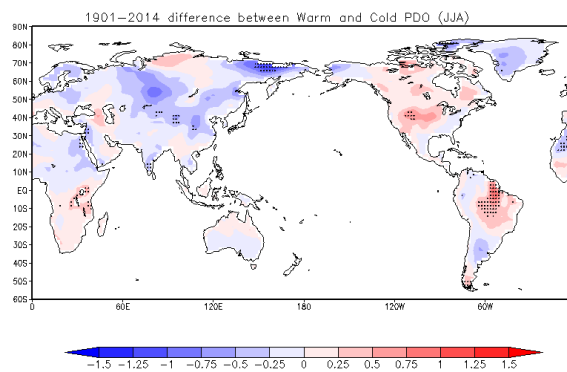
### Annual

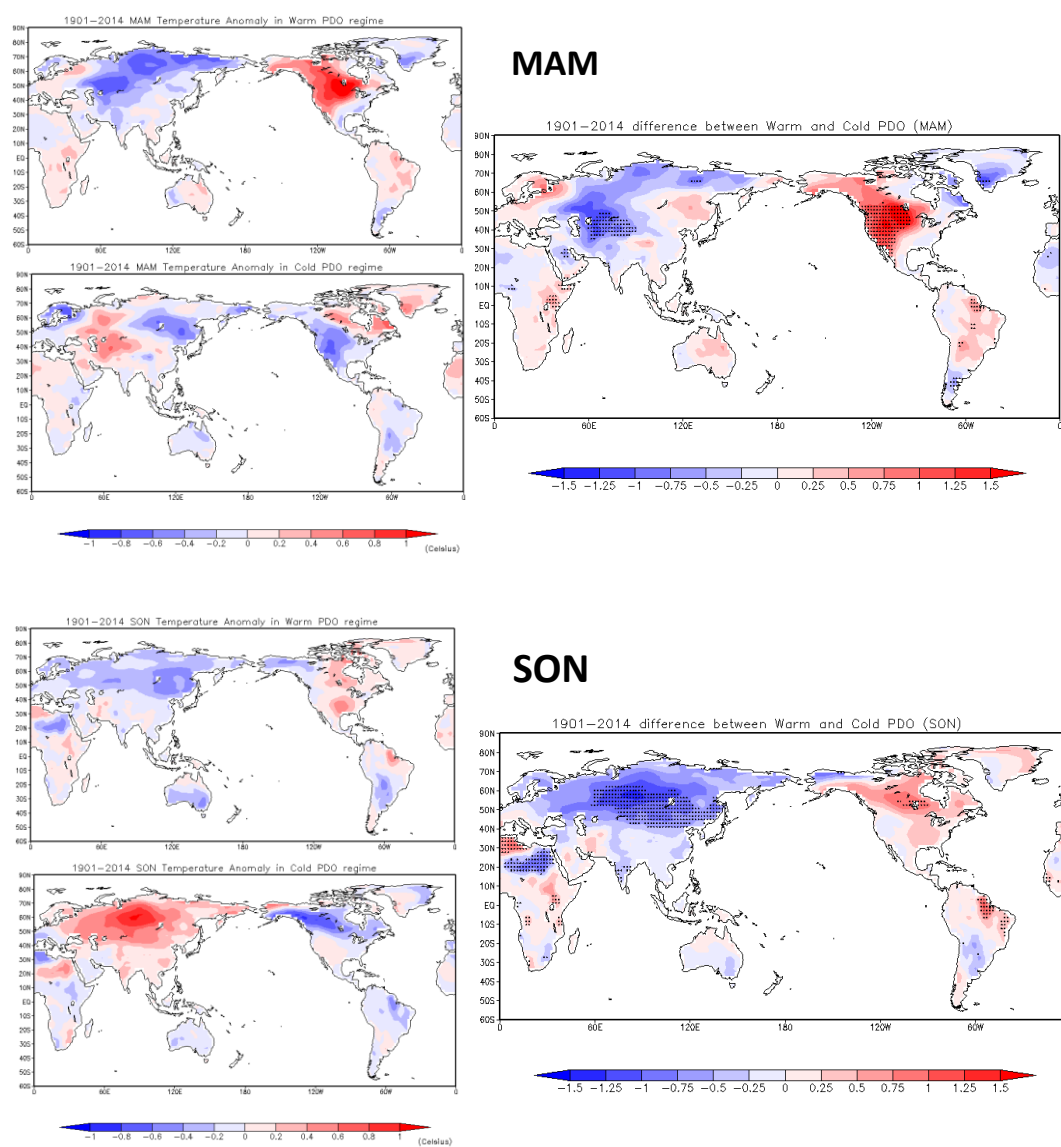


### DJF



### JJA





**Supplementary Figure1. 1901-2014 Seasonal Temperature anomaly in Warm PDO regime(top) and Cold PDO regime(bottom) and its difference(right) and significance**

## Reference

1. Seung-Ki Min et al. Changes in Weather and Climate Extremes over Korea and Possible Cause: A Review (Asia-Pac. J. Atmos. Sci, 2015)
2. Kevin E. Trenberth et al. Seasonal aspects of the recent pause in surface warming (Nature climate change, 2014)
3. Kevin E. Trenberth. Has there been a hiatus? –Internal climate variability masks climate-warming trends (Science, 2015)
4. Kevin E. Trenberth & John T. Fasullo. An apparent hiatus in global warming? (AGU, 2013)
5. Kevin E. Trenberth et al. Attribution of climate extreme events (Nature climate change, 2015)
6. Judah L. Cohen et al. Asymmetric seasonal temperature trends (Geophysical research letters, 2012)
7. Stocker T. F. et al., Summary for Policymakers In: Climate change 2013: The physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013)
8. England, M. et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus (Nature Climate Change, 2014)
9. Yu Kosaka and Shang-Ping Xie. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling (Nature, 2013)

## Thanks to

Seung-Ki Min, Yeon-Hee Kim, Min-Gyu Seong, Hwa-Jin Choi, CCRL