

HadCRU4 관측 온도자료와 20CR 재분석 자료 비교로부터 확인된 1900년대 초반 극지역 평균 온도 추정의 불확실성

김백민* · 김진영**

극지연구소 극지기후변화연구부*, 한국과학기술연구원 녹색도시기술연구소**

Uncertainty in the Estimation of Arctic Surface Temperature during Early 1900s Revealed by the Comparison between HadCRU4 and 20CR Reanalysis

Kim, Baek-Min* and Kim, Jin-Young**

*Division of Polar Climate Research, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea,

**Green City Technology Institute, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

ABSTRACT

To discuss whether we have credible estimations about historical surface temperature evolution since industrial revolution or not, present study investigates consistencies and differences of averaged surface air temperature since 1900 between the multiple data sources: Hadley Center Climate Research Unit (HadCRU4) surface air temperature data, ECMWF 20 Century Reanalysis data (ERA20CR), and NCEP 20 Century Reanalysis data (NCEP20CR). Averaged surface temperatures are obtained for the global, polar (90S~60S, 60N~0N), midlatitude (60S~30S, 30N~60N), tropical (30S~30N) region, separately. From the analysis, we show that: 1) spatio-temporal inhomogeneity and scarcity of HadCRU4 data are not major obstacles in the reliable estimation of global surface air temperature. 2) Globally averaged temperature variability is largely contributed by those of tropical and midlatitude, which occupy more than 70% of earth surface in area. 3) Both data show consistent temperature variability in tropical region. 4) ERA20CR does not capture warm period over Arctic region in early 1900s, which is obvious feature in HadCRU4 data. Discrepancies among datasets suggest that high-level caution is needed especially in the interpretation of large Arctic warming in the early 1900s, which is often regarded as a natural variability in the Arctic region.

Key words : Arctic Warming, Climate Research Unit (CRU), ECMWF 20 Century Reanalysis Data (ERA20CR), Historical Temperature Reconstruction

1. 서 론

현재 인류는 신생대 제 4기의 간빙기에서 빙하기로 접어드는 시기에 살고 있다. 산업혁명 이후 진행된 인간 활동에 의한 지구온난화는 홀로세(Holocene) 기간 동안 수천 년 간 서서히 하강하던 전 지구 평균 지상 대기 온도를 200년이 채 안 되는 지질학적으로 매우 짧은 시간 동안에 급반전시키는 결과를 초래했다. 즉, 산업혁명 이후 지구시스템은 유래를 찾기 힘들 정도로 짧은 시간에 매우 급격한 온난화를 겪고 있으며, 이는 홀로세 기간 동안의 모든 자연변동의 범위를 뛰어 넘는

강력한 온난화였음이 입증되고 있다(Marcott *et al.*, 2013).

특히, 금세기 들어 북극권은 지구상 어떤 지역보다 온난화 현상이 가속화되고 있으며, 이로 인해 오랫동안 유지되어 온 북극해와 북극해 연안의 기후환경 역시 급격히 바뀌어가고 있다(Bhatt *et al.*, 2010; Corbett *et al.*, 2010; Screen and Simmonds 2010; Serreze *et al.*, 2009). 따라서 산업혁명 이후 전 지구 평균온도 변화 경향을 분석함에 있어 극지역에서의 온도 변화에 대한 정확한 추정은 인위적인 인간 활동에 의해 초래된 대기 강제력에 대한 지구시스템의 정교한 반응을 이해 하고, 미래 예측을 함에 있어 매우 중요하다. 그러나 북극의

† Corresponding author : E-mail: jykim@kist.re.kr

Received April 30, 2015 / Revised May 22, 2015(1st), June 8, 2015(2nd) / Accepted June 24, 2015

지상 대기 온도의 급증이 산업혁명 이후 전 지구 평균온도 증가에 얼마나 기여하고 있는지, 북극의 지상기온 변화는 인간 활동에 의한 이산화탄소 증가 경향과 어떤 유사성이 있는지, 과거에도 이러한 북극 지상 온도의 급증이 있었는지 등에 대한 연구는 아직 많이 부족한 상황이다.

본 연구에서는 산업 혁명 이후 전구와 극지, 적도 지역의 기온변동이 각각 어떻게 변화해 왔는지, 다양한 소스의 자료를 이용하여 살펴보고자 한다. 과거연구들에서 금세기 및 지난 세기 기후변화를 추정하는데 있어 Climate Reserach Unit (CRU) 지상온도 실측 자료를 많이 활용해 왔으며, 전구 평균 온도 추정을 위해서는 육상자료인 CRU 자료와 헤들리 센터 (Hadley Center)에서 해양선박 및 해양 부이자료를 후처리하여 제공하는 해수면 온도자료를 결합하여 격자화한 자료인 HadCRU 자료를 연구에서 주로 활용해 왔다(Jones *et al.*, 2010; Kennedy *et al.*, 2011; Morice *et al.*, 2012; Osborn and Jones 2014). 그러나 실측자료를 활용한 지난 세기 전 지구 평균온도 변화 추이 등에 대한 연구들은 다양한 형태의 관측 오차들로 인해 심각한 추정 불확실성에 노출되어 있었으며, 특히 세계 제2차 대전 시기와 같은 관측이 힘들었던 시기들의 해상자료들에서 이러한 문제점들은 더욱 부각되고 있다(Kennedy *et al.*, 2011). 또한, 육상 지표 관측의 경우에는 많은 수의 관측소들이 도시화 영향에 직접 노출되어 있었던 점이 큰 추정 불확실성을 야기해 왔다(Yang *et al.*, 2011).

이러한 불확실성에 대한 과학자들의 인식으로부터 최근에는 이를 보완하는 연구 방법들이 대두되고 있다. 한 가지 방법은 육상의 지상기온 자료를 배제한 채 해면 기압, 해상 바람장 등을 대기모델에 자료 동화하여, 역으로 산업혁명 이후의 지표 온도를 추정해 내는 방법이다(Whitaker *et al.*, 2009).

본 연구에서는 보조 재분석 자료들인 ECMWF 20 Century Reanalysis data(ERA20CR)와 미국 해양대기청(NOAA: National Oceanal and Atmospheric Administration)의 PSD(Physical Sciences Devison)에서 제작한 NCEP20CR의 변동 특징을 분석하고, 실측 전구 지상 기온자료인 HadCRU4와 비교 검증하였다.

2. 자료 및 연구방법

2.1. 자료

본 연구에 사용된 지표 관측 자료인 HadCRU4는 CRUTEM4 지상 기온 자료와 HadSST3 해수면 온도 자료의 조합으로 구성되어 있다. 연구 수행에 있어 HadCRU4 자료를 육지와 해양 구분 없이 전구 평균 혹은 지역 평균하여 지상 온도 자료 변

동을 주로 분석하였다. 이 경우, 해양에서는 육상에서와 같이 지상기온 실측자료를 활용함이 더욱 타당하나, 해양의 지상기온 실측자료의 경우 SST 실측자료에 비해 장기 자료 확보에 어려움이 있으며, 또 측정에 있어서 SST에 비해 기술적인 문제점들이 존재하여 HadCRU4에서는 대신 SST를 제공하고 있다(Parker *et al.*, 1994). 한편, SST와 해양에서의 지상기온 자료 간에는 대부분의 지역에서 0.1도 미만의 차이가 존재함이 알려져 있어서 지역규모 이상을 다루는 연구에서는 SST를 해양의 지상기온으로 간주하여도 무리가 없음이 알려져 있다(Kenedy *et al.*, 2011). 특히, HadCRU4의 경우, 1961~1990년 동안의 기후 값으로부터 계산된 아노말리를 이용하므로 지상 기온과 해수면 온도 간에 존재하는 바이어스 값이 제거된 상태로 영역 평균되므로 육지와 해양의 구분 없이 직접 평균하여 기온변화 경향을 분석하여도 무방하다.

연구에 사용된 20세기 재분석 자료 중 하나인 NCEP20CR은 현재 미국 해양대기청(NOAA: National Oceanal and Atmospheric Administration)의 PSD(Physical Sciences Devison)와 콜로라도 대학에서 공동으로 만든 자료로 1870~2010년의 전구 대기 순환자료를 제공하고, 기존 재분석 자료와 달리 검증 가능한 자료의 통계 특성을 제공한다는 점이 특징적이다. 이것이 가능한 이유는 자료 작성 시 56개의 앙상블 멤버를 사용하여 이용했기 때문이다. 따라서 이 자료를 활용하면 20세기의 다양한 기후모델의 불확실성을 검증하는데 활용될 수 있다. 본 자료를 생성하기 위해 사용된 관측 자료는 전구의 월간 해수면 온도, 해빙자료가 사용되었다. 자료동화 방법으로는 앙상블 칼만필터가 사용되었다. 모든 다른 재분석 자료들과 마찬가지로 자료의 장기 경향성의 경우 검증이 되어 있지 않아 타 자료와 비교 검증이 현재까지도 필요한 상태이고, 특히 지역 규모 특성에 있어 활용에 주의해야 한다. 연구에 활용되는 또 다른 재분석 자료인 ERA20CR의 경우, 기본적인 자료 생산 방법 및 입력자료에 있어 NCEP20CR과 유사하다. 단, ERA20CR의 경우, 해면 기압 이외에 추가로 해양의 지표 바람장을 동화하였으며, 4차원 자료동화 방법을 활용하였다. ERA20CR은 사용자 그룹에 생성된 20개의 앙상블 멤버를 모두 제공하며, 본 연구에서는 20개의 앙상블 멤버를 평균한 앙상블 평균자료를 사용하였으며, 변동성 추정에 앙상블 멤버의 스프레드를 사용하였다.

2.2 연구방법

본 연구에서는 전구를 북극 지역(60N~0N), 적도/중위도(60S~60N), 남극 지역(90S~60S), 적도지역(30S~30N)으로 구분,

1900~2009년까지 구역별 평균 지표온도 추이를 살펴보았다. HadCRU4의 경우, 실측자료라는 장점이 있지만 모델자료가 전혀 사용되지 않아서 고위도나 산간지역과 같은 특정 지역의 경우 아예 자료가 없으며, 과거로 갈수록 사용되는 격자의 숫자가 줄어들어 제대로 된 변동성을 추정하는데 있어 문제가 있다. 20세기의 기후변동 특성을 추정할 수 있는 ERA20CR 자료 및 NCEP20CR의 경우, 모델과 관측자료의 합성이라는 측면에서 보면, 실측자료에 비해 신뢰도 자체는 떨어진다고 볼 수 있다. 그러나 이 자료들의 경우, 시공간적으로 항상 균일한 자료들을 생산해 낸다는 장점이 있어 두 자료는 서로 보완하는 측면을 지니고 있어 20세기 기후변동성의 특징을 조사해 보는데, 이 두 자료를 함께 살펴보는 것이 이상적이라고 할 수 있다. 그러나 시공간적으로 매우 균질한 ERA20CR 자료와 시공간적으로 매우 불균질한 HadCRU4 자료를 지역 평균, 시간 평균하여 직접 비교함으로써 인해 생길 수 있는 많은 문제점들이 있을 수 있다. 예를 들어, 남극 반도의 경우, HadCRU4에는 관측점이 거의 없다(Fig. 1). 따라서 남극지역(90S~60S) 평균을 취함에 있어 남극 대륙의 특성이 거의 반영되지 못하고 대부분 주변 남극해 영역의 자료들만이 반영되어 평균되는 특징이 있으므로 이것을 남극 대륙의 특징이 모두 온전히 반영되는 재분석 자료와 일대일로 비교한다는 것은 방법론상으로 문제가 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 ERA20CR자료의 경우 다음 두 가지 형태로 준비하였다.

- 1) 원자료를 변형하지 않고, 그대로 북극 지역(60N~0N), 적도/중위도(60S~60N), 남극 지역(90S~60S), 적도지역(30S~30N)별 평균 지상 온도를 계산
- 2) HadCRU4의 자료가 존재하는 시공간 격자점으로 원자료를 내삽 후, 자료가 있는 격자만을 사용해서 북극 지역(60N~90N), 적도/중위도(60S~60N), 남극 지역(90S~60S), 적도 지역(30S~30N)별 평균 지상 온도를 계산

이러한 방식을 통하여 시공간적 비균질성이 매우 큰 HadCRU4 자료와 균질한 재분석 자료를 합리적으로 비교하였다. 방법 2)의 경우 HadCRU4 자료가 존재하는 격자만을 속아내야 하므로 만들어진 자료를 ERA20CR 마스크 자료라고 지칭한다. 프로세싱에 필요한 내삽방법의 경우 스플라인 방법을 채택하였다.

3. 연구 결과

3.1 산업혁명 이후 이산화탄소 변화 추이 및 증가율 (Growth Rate)

미국 하와이 섬 마누아-로아 섬에서 측정되고 있는 이산화탄소 농도는 꾸준히 증가하고 있다. 이 지역에서 측정된 값과 전 지구 평균 CO₂ 농도는 완전히 일치하지 않으나, 대체적으로 일치하는 경향성을 보여준다. 1960년경에 320 PPM 수준이던 이산화탄소 농도가 2014년 4월 최초로 400 PPM을 돌파하였다. 약 50년 만에 80 PPM의 증가를 보인 셈이다. 지구 역사상 이러한 급격한 이산화탄소의 증가는 그 유례를 찾아보기 힘들다. 한편, 최근 50년 동안 이산화탄소 농도는 일정하게 증가한 것이 아니라, 최근으로 오면서 그 증가 경향이 커지고 있다(Fig. 2). 이러한 증가 경향성의 변화를 모두 인간 활동에 의한 것으로 돌릴 수는 없지만, 최근 들어 이산화탄소의 증가 경향이 IPCC를 비롯한 세계 각국의 노력에도 불구하고, 오히려 가속화되고 있는 점은 크게 우려스러운 상황임에 분명하다.

3.2 산업혁명 이후 온도추이 분석(HadCRU4 vs NCEP20CR)

산업혁명 이후부터 현재까지의 적도지역, 극지 및 전구 평균 온도추이를 HadCRU4 자료와 NCEP20CR 자료로 살펴본다(Fig. 3, Fig. 4). Fig. 3을 보면, 20세기에는 모든 영역에서 온도의 증가경향이 있음을 확인할 수 있다. 특히 온도 상승은 북극과 남극 즉 양극에서 가장 크며, 적도 지역과 전구 평균온도는 거의 비슷하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 이 그래프만으로 해석해 보면 전구 평균온도는 전구를 극지(60N~0N 또는 90S~60S), 중위도(30N~60N 또는 60S~30S), 적도(30S~30N)으로 나누어 보았을 때, 그 영역이 가장 넓은 적도 지역의 평균온도에 의해 대부분 결정되고 있음을 알 수 있다. 따라서 비록 남극과 북극의 경우, 온도 증가 폭이 산업혁명 이후 거의 3도에 육박하고 있음에도 불구하고, 전 지구에서 차지하는 작은 면적으로 인해 전구 평균에 기여하는 바가 매우 작다고 해석할 수 있을 것이다. 그러나 그래프를 자세히 살펴보면, 1850년대부터 1900년대 초반까지는 전구 평균온도가 적도지역 평균온도가 약간 낮게 위치하고 있음에 반해, 1950년대 이후에는 적도지역보다 더 높은 온도를 보여주고 있음을 알 수 있으며, 이러한 변화 경향은 극지에서의 평균온도 경향과 일치한다. 따라서 작은 변동이지만 극지에서의 온도 경향이 반영된 결과로 해석된다. 이 그림에서 남극의 경우, 1900년 이전 자료가 존재하지 않으며, 남극 자료의 경우 1900년대부터 1950년대 사이의 변동성이 매우 큼을 확인할 수 있다. 이는, 남극지역의 매우 부족한 관측자료 숫자로 인해 공간 평균을 하여도 특정 관측 사이트의 지역적인 변동이 그대로 포함되어 있음을 알 수 있다. 이 이슈에 대해서는 다음 장에

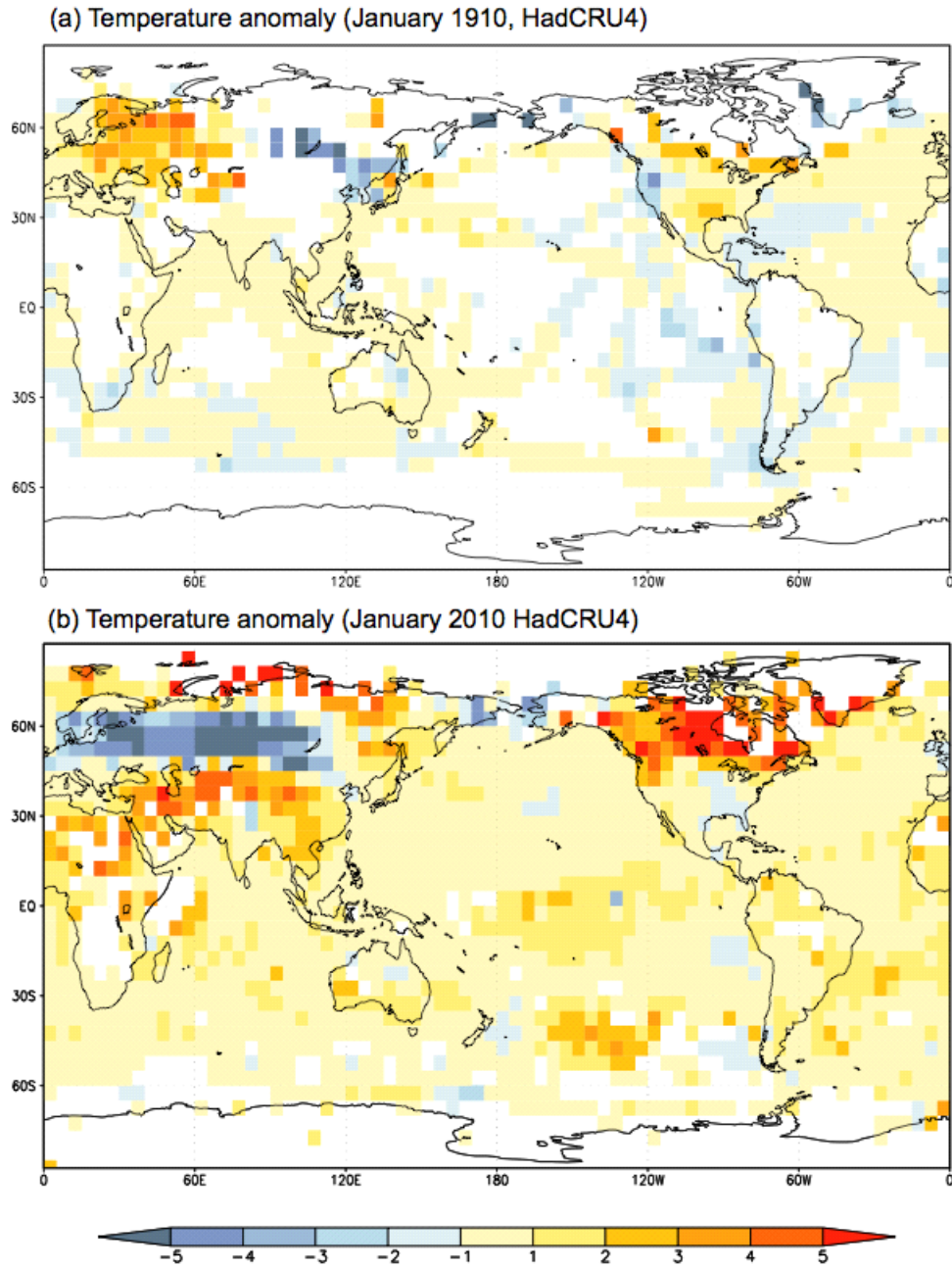


Fig. 1. Temperature anomaly of HadCRU4 data for (a) January 1910 and (b) January 2010. Anomaly is obtained by departure from 1961~1990 climatology.

서 ERA20CR을 사용한 분석에서 시공간적 비균질성을 보완한 분석 결과를 제시한다.

Fig. 4의 경우, NCEP20CR 재분석 자료를 사용하여 동일한 그림을 그려 보았다. NCEP20CR 재분석 자료에서도 모든 지역의 온도는 산업혁명 이후 증가경향이 뚜렷함은 변함이 없다. 주목할 만한 점은 적도 지역의 온도 변동 특징이 HadCRU4와

는 매우 다른 양상으로 전개된다는데 있다. NCEP20CR의 경우, 적도 지역 평균 온도의 상승폭은 매우 작다. 특히 적도 지역의 경우 온도가 과거에도 이미 상당히 높았음을 확인할 수 있다. 다르게 해석하면, 전구 평균온도가 산업혁명 이후부터 1950년대까지는 적도지역 평균에 비해 상당 수준 낮았으며, 이것이 1950년대 이후로 들어오면서 적도지역 평균과 비슷한

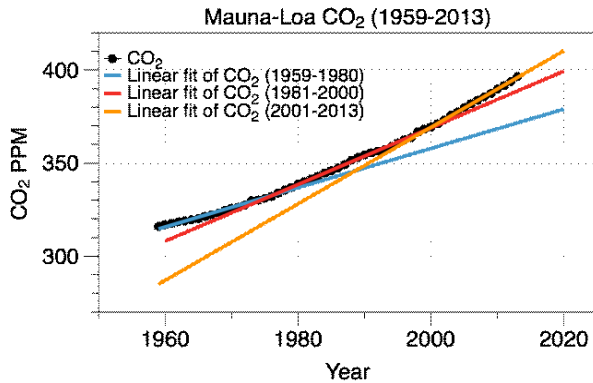


Fig. 2. Annually averaged CO₂ concentration from Mauna-Loa island and linear trend for different decadal periods (1959~1980: Solid blue, 1981~2000: Solid red, 2001~2013: Solid yellow).

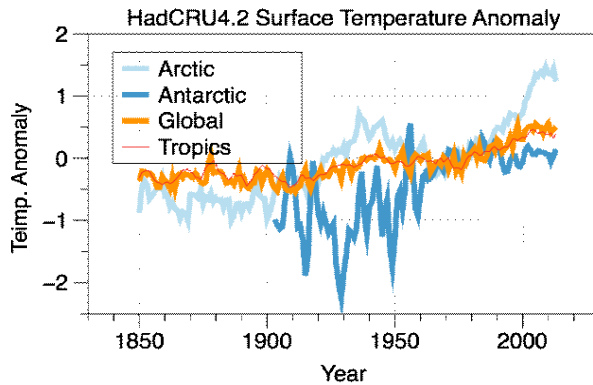


Fig. 3. Area averaged mean surface temperature obtained by HadCRU4 (Arctic: Solid aqua blue, Antarctic: Solid dark blue, Global: Yellow, Tropics: Red). Data period: 1850~2012.

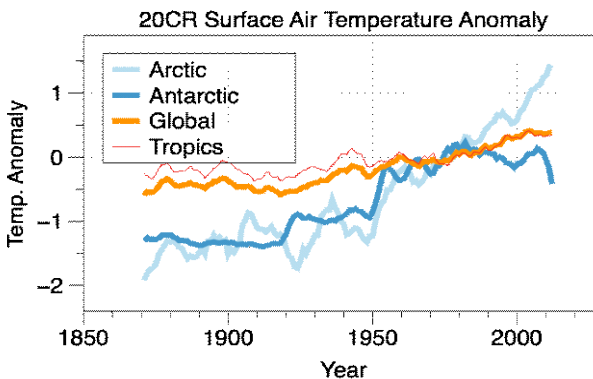


Fig. 4. Regional mean surface air temperature obtained from NCEP20CR data (Arctic: Solid aqua blue, Antarctic: Solid dark blue, Global: Yellow, Tropics: Red).

수준이 되었다. 더욱이 NCEP20CR의 경우, 극지역에서의 온도는 HadCRU4에 비해 더 낮았으며, 이를 종합하여 볼 때, 20CR 자료에서는 극지가 전구 평균온도에 기여하는 부분이 HadCRU4에 비해 크다고 할 수 있다.

3.3 산업혁명 이후 온도추이 분석(HadCRU4 vs ERA20CR)

연구방법에서 기술한 분석방법을 통해 계산된 HadCRU4와 ERA20CR 자료의 전구 평균 지상기온을 그려 보았다. 자료의 장주기 변동 패턴을 살펴보기 위해 모든 자료는 5년 이동 평균을 취하였다. 전구 평균온도의 경우, 비교적 세 자료의 변화 양상이 동일하게 나타났다. 1900년 초에 시작된 급격한 온도상승은 1940년대 초중반까지 이어지나, 그 이후 1970년대까지는 완만한 온도 하강이 이어지고, 다시 1970년대 이후 현재까지 급격한 온도상승을 보여준다. 1940~1970년대의 온도 하강구간에 대해서는 기존 연구에 따르면 1945년경에 급격한 0.3도 정도의 온도하강이 이 구간을 만들어 내는데 큰 역할을 한다고 알려져 있으며, 또한 이 급격한 온도하강의 경우, 1945년 전후로 해수 온도 측정 방식이 달라짐으로 인한 문제점이 선행 연구에서 지적된바 있다(Thompson *et al.*, 2008). Fig. 5에서 특징적인 점은 비록 HadCRU4가 다소 기온의 높은 특징이 있지만 두 자료의 1940년까지의 변화경향은 비슷한 특성을 보여준다. ERA20CR의 경우, 온도에 대한 직접 관측 정보가 전혀 사용되지 않았다는 점에도 불구하고, 두 자료가 일치하는 경향성을 나타낸다는 것은 양 관측 자료가 추정한 지표온도의 신뢰성이 크음을 의미한다. HadCRU4의 시공간 격자로 내삽한 ERA20CR 마스크 자료의 경우, 역시 동일한 온도 경향을 보이며, 이는 HadCRU4 시공간 격자의 불균질성이 전구 평균 온도를 추정하는데 큰 문제가 되지 않음을 의미하고, 평균시 충분히 전체 격자를 대표할 수 있을 만큼의 시공간 격자는 확보되어 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

남극 영역에 대하여도 동일한 분석을 수행하였다. HadCRU4의 남극 자료의 경우, 세 구간(1900~1940년 중반, 1940년 중반~1970년, 1971년~)으로 나누어지는 특징을 보이는 전구 평균온도의 특성이 나타나지 않는다. 따라서 이 지역의 온도 변동이 전구 평균온도에 나타나는 30년 이상규모의 변동특성에 기여하지 않는 것으로 보인다. 물론, 그렇다고 하더라도 남극지역의 자연변동성이 전구 평균온도의 장주기 변동에 아무 영향을 주지 않는다고 결론을 내릴 수는 없다. 다만, 직접적인 전구 평균 온도에 대한 기여가 상대적으로 작은 남극면적(전구에 비해)과 더불어 그 온도 변동 경향에 있어서도 그를 설명하기는 힘들다는 것을 의미한다. 남극 자료를 살펴보면(Fig.

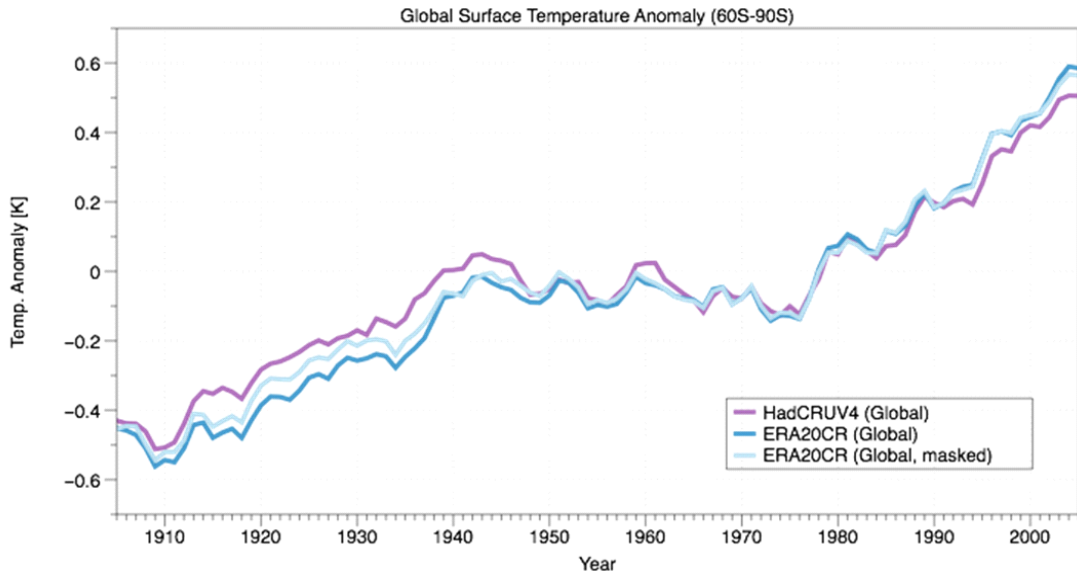


Fig. 5. Global mean surface air temperature anomaly obtained from ERA20CR data (Solid purple: HadCRU4, Solid dark blue: ERA20CR, Solid aqua blue: masked ERA20CR).

6), 특징적으로 HadCRU4 자료의 경우, 1900년대 초반에 변동성이 매우 큼을 알 수 있다. 이러한 변동성이 실제 대기에 존재하는 자연변동성에 의한 것으로 보기는 어렵다. 왜냐하면, 그 이후 시기인 1940년대 이후에 있어서는 이러한 변동성이 매우 작아지고, 재분석 자료의 변동에 가까운 크기로 수렴하기 때문이다. 이러한 남극관측 평균온도의 특징은 1900년

대 초반기에 특히 부족한 관측자료에 기인한다고 볼 수 있다. 이러한 변동 특성을 감안하더라도 HadCRU4 자료의 경우, 지속적인 온도 증가가 있음을 알 수 있으며, 이러한 특성은 남극 지역에 균질한 형태로 자료가 확보되어 있는 재분석 자료인 ERA20CR의 온도 경향(짙은 푸른색, Fig. 7)을 살펴보면 더욱 뚜렷이 확인된다. ERA20CR의 남극 기온의 경우, 1900

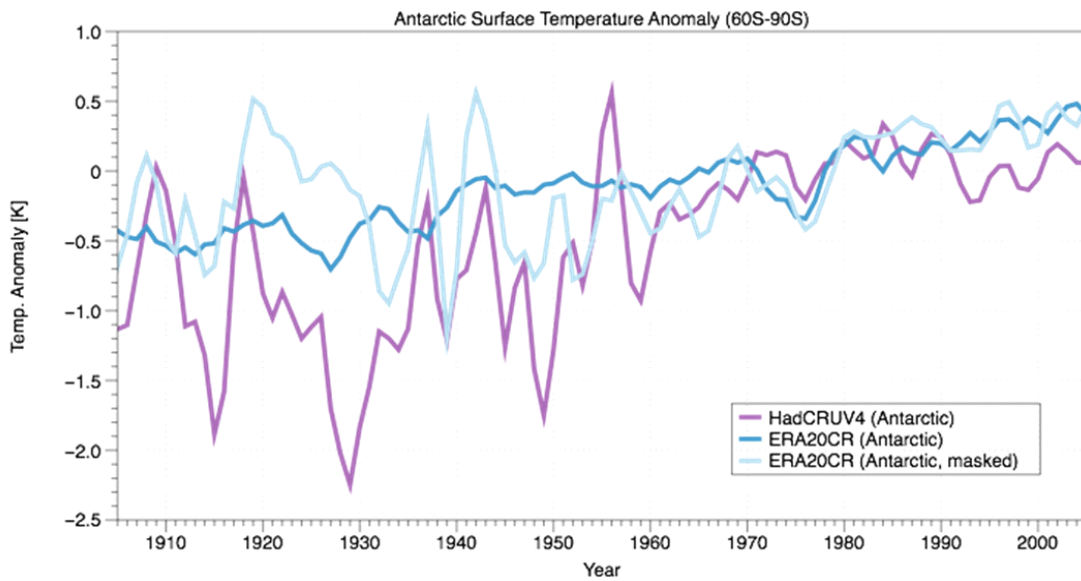


Fig. 6. Surface air temperature anomaly of Antarctic region from ERA20CR data (Purple: HadCRU4, Dark blue: ERA20CR, Aqua blue: masked ERA20CR).

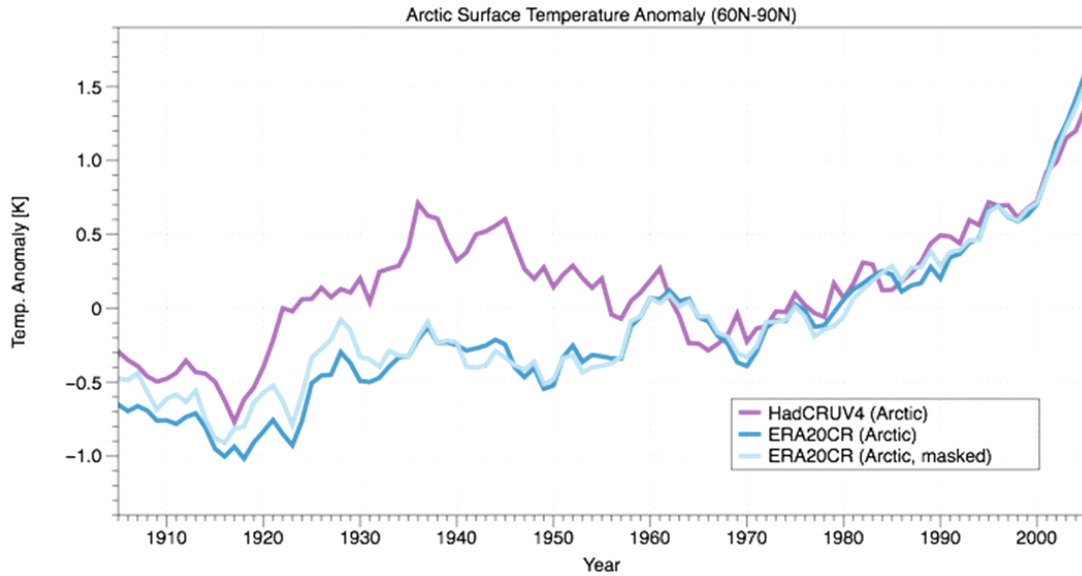


Fig. 7. Mean surface air temperature anomaly for Arctic region from ERA20CR (Purple: HadCRU4, Dark blue: ERA20CR, Aqua blue: masked ERA20CR).

년대 초 -0.5°C 에서 2000년대에 0.5°C 정도로 약 100년간 1도 정도의 온도 상승이 있음이 확인된다. 마스크 된 ERA20CR 자료(엷은 푸른색, Fig. 7)의 경우, HadCRU4와 같이 1900년대 초반에 변동성이 확대되는 현상이 재현되었다. ERA20CR이 이러한 변동성을 재현했다는 것은 확실히 HadCRU4에서의 1900년대 초반 변동성이 특정 자연변동성이 아닌, 관측 지점 부족으로 인해 지역적인 변동 특성이 크게 반영된 결과임을 알려준다. 정리하면, 남극 영역의 경우, 1900년대 초반에 관측 격자 부족으로 인해 나타나는 변동성 확대 특성을 제외하면 전체적으로 선형적으로 온도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 지구 평균온도 증가가 약 30년 정도의 주기로 변동성이 확대되었다가 줄어들었다가 하는 현상이 남극에서는 나타나지 않고 있음을 의미한다.

북극 영역에 대하여도 동일한 분석을 수행하였다. HadCRU4의 북극자료의 경우, 세 구간(1900~1940년 중반, 1940년 중반~1970년, 1971년~)으로 나누어지는 특징을 보이는 지구 평균온도의 특성이 다시 뚜렷이 나타나는 특징을 보여준다. 또한, 북극의 경우 온도 변동 폭 역시 큰데, 1910~1920년에 약 -0.8°C 의 온도를 나타내었는데 그 후 1940년대까지 매우 급격한 온도상승을 보이고, 1940년대 초까지 약 1.5°C 의 큰 상승을 보인다. 본 연구에서 5년 이동평균을 수행하였음을 감안하면, 실제 연평균온도의 경우 2°C 이상의 상승에 해당될 것이다. 이러한 큰 온도 변동은 비록, 북극의 면적이 전 지구 평균면적의 약 15%가 되지 않아 가중평균시 그 특징이 크게 반

영되지 않는다고 해도 지구 평균 감안 시 충분히 영향을 줄 수 있는 양이라고 판단된다. 이러한 북극지역의 특징은 선형적으로 꾸준히 나타나는 남극지역의 지상 온도 특징과 구별된다. ERA20CR로 살펴본 북극 기온 변동은 HadCRU4와 대조적으로, 1900~1940년대의 온도 상승이 상대적으로 제한적이었다. 기온은 완만하게 1970년대까지 상승으로 이어지다가 1970년대 이후 급격히 증가하는 패턴을 보였다. 1970년대 이후의 급격한 온도상승은 HadCRU4와 재분석 자료 모두 매우 일치하는 경향을 보인데 반해, 1940년대에 피크가 나타나는 HadCRU4 자료와 재분석 자료의 경우, 그 차이가 매우 큼을 알 수 있다. 본 연구에서 이러한 차이점의 원인을 정확히 규명하는 것은 어려우나, 두 자료에 대한 차이점을 확인했다는 것은 본 연구의 주요 성과이다. 두 자료를 자세히 분석 결과, HadCRU4에 만 있는 아래 두 가지 특징을 발견하였다.

- 1) 1900년 초반부터 시작되어 1940년대까지 유지된 북극의 급격한 온난화
- 2) 1940년대 중반부터 시작되어 1970년대 중반까지 이어지는 한랭화

이에 대한 자세한 분석은 본 보고서에 다루기는 어려우나, 몇 가지 추정이 가능하다. 먼저, 북극지역의 해수면 온도자료가 잘못되었을 가능성이 있다. HadCRU4의 경우, 북극자료는 상당부분이 대륙의 관측 온도자료로 구성되어 있다. 이에 반해, 재분석 자료는 대륙의 온도 자료는 직접 사용되지 않았으며, 내륙에서는 단지 해면기압만 자료동화에 사용된다. 만약,

북극의 1900년대 초반 급격한 온난화가 주로 대륙에서 나타나는 현상이라면 재분석 자료는 온도자료를 직접 동화하지 않아서 이러한 경향성이 잘 모의되지 않을 수 있다. 그러나 이런 경우에도 만약 북극지역의 해수면 온도 자료의 품질이 좋고, 모델의 성능이 신뢰할만하다면 대륙의 지상 기온을 HadCRU4 자료에서와 비슷하게 모의 가능했을 것이다. 이로부터 추정해 볼 때, HadISST의 북극지역 해수면 온도가 실제 관측에 비해 차갑게 분석되어 있을 가능성이 있다. 혹은, 사용된 해빙 자료의 부정확성에 기인할 가능성도 배제할 수 없다. 만약 해수면온도가 포함되지 않은 CRU 육상 지상 기온 자료만을 비교해 보면 이러한 일련의 추정이 더욱 확실해질 것으로 생각된다. 만약 1900년 초반 해수면 온도 추정 자체에 문제가 있어 한랭 바이어스가 있는 게 맞다면, 1940년대 중반의 급격한 온도 하강이 재분석 자료에 나타나지 않은 것 역시 설명되어진다.

중위도지역과 적도지역, 적도지역만을 평균한 지표온도에 대해서도 동일한 분석을 수행하였다(Fig. 8). 이 경우에 있어서는 관측과 재분석 모두 매우 일치한 결과를 보여 전구평균온도의 경우와 거의 일치되는 결과를 얻었다. 즉, 세 구간(1900~1940년 중반, 1940년 중반~1970년, 1971년~)으로 나누어지는 지표온도 변동 특징이 잘 나타나고 있으며, 따라서 이 지역의 온도 변동이 전구 평균온도에 나타나는 30년 이상규모의 변동특성을 잘 반영하고 있는 것으로 보인다. 이 지역의 전 지구에서 차지하는 면적비로 50%가 넘는 것을 감안할 때, 전구

평균온도가 이 지역들의 평균온도와 거의 일치하는 것은 예측되는 결과이다. Fig. 5와 비교하여 볼 때, 1900년대 초반에 전구 평균온도가 재분석 자료에 비해 크게 나타나는데, 이 특징을 적도/중위도 지역의 재분석 지상온도 자료(Fig. 8) 온도와 비교해 보면, 적도/중위도 지역에서는 HadCRU4와 ERA20CR 자료가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 전구 지표온도에 나타나는 1900년대 초의 가파른 온도 상승은 상당부분 북극과 중위도 지표지역의 온도 상승에 기인하고 있음을 알 수 있다.

끝으로, 마누아-로아 섬에서 측정된 대기 중 이산화탄소 농도변화와 전 지구 평균온도를 함께 비교해 보았다. 비교를 위해 자료들은 모두 정규화 한 후 같은 그림에 나타내 보았다(Fig. 9). 이 그림에서 전구 평균온도는 이산화탄소 농도 증가에 반응하며 상승하고 있으며, 특히 1970년대 이후 이산화탄소 농도의 증가율이 커짐에 따라 온도상승도 함께 커지고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 앞에서 살펴본 1990년대 이후의 급격한 북극에서의 온도 상승으로 인해 이산화탄소 그래프 아래에 있던 전구 평균온도가 90년대 중반을 기점으로 거의 함께 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, 1900년대 초반의 전구 평균온도의 경우, 이산화탄소 증가 경향에 비해 비교적 급격한 온난화 경향이 있는데, 이 경향성은 1940년대 중반을 기점으로 1970년대까지 완만한 온도 하락을 보여준다. 그러나 이 기간 동안 이산화탄소의 경우 매우 완만하게 상승하고 있어서, 이산화탄소의 증가가 이 기간 장주기(약 30년 주기) 변동

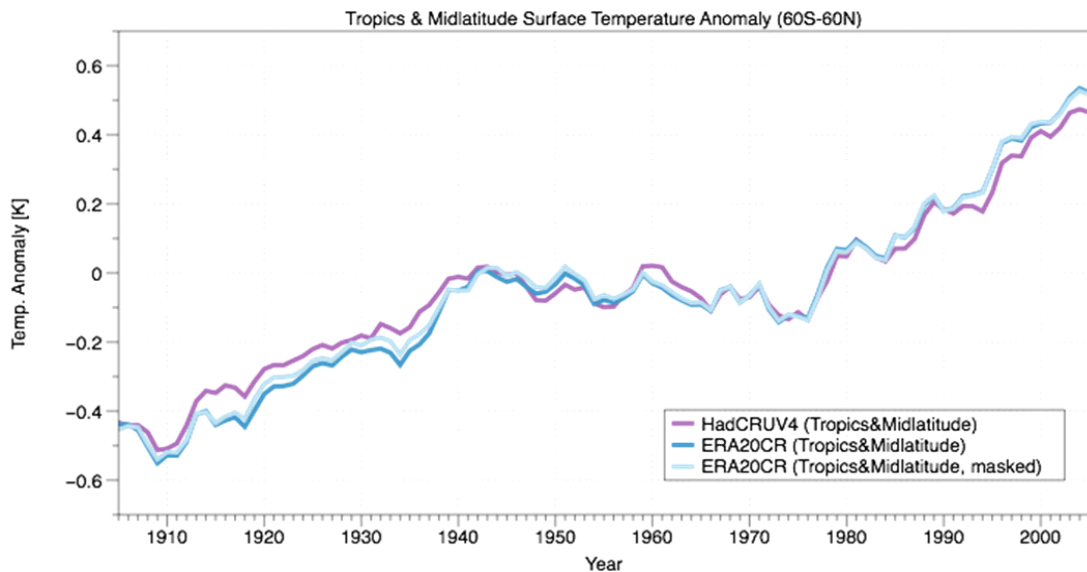


Fig. 8. Mean surface air temperature averaged over tropics and midlatitude from ERA20CR (Purple: HadCRUV4, Dark blue: ERA20CR, Aqua blue: masked ERA20CR).

을 설명하지는 못하는 것으로 확인된다. 다만, 이 기간 동안의 온도는 장주기 변동을 포함하면서 완만하게 상승하는데, 이는 이산화탄소 증가 경향과 잘 매치되고 있음을 알 수 있다.

앞에서 살펴본 바와 같이, 남/북극 지역에서의 평균 온도의 경우 HadCRU4와 재분석 자료가 매우 큰 차이가 있음에도 불구하고, Fig. 9에서 본 바와 같이 전구 평균된 온도의 경우 그 차이가 작아진다는 것을 알 수 있다.

4. 정리 및 토의

본 연구에서는 HadCRU 지상 온도자료와 재분석 자료들인 NCEP20CR과 ERA20CR 자료를 활용하여 산업혁명 이후의 지상온도 변화의 특징을 상호 비교, 분석하여 자료들 간의 일치성, 차이점 등을 분석하였다. 특히, 상대적으로 극지 자료가 빈약한 HadCRU4 자료와 재분석 자료들의 변동성을 비교함으로써 자료 부족이 극지역 온도 추정의 불확실성에 주는 영향을 평가하였다. 이를 위해 자료 분석영역을 전구, 극지(90S~60S, 60N~0N), 중위도(60S~30S, 30N~60N), 적도(30S~30N)의 세 영역으로 구분하고, 각 영역, 각 자료의 변동 특성을 분석하였다. 분석 결과, 결과는 다음과 같다.

- 1) 산업혁명 이후 전구 평균 지상온도 추이의 경우, HadCRU4와 ERA20CR은 분석기간 동안 매우 유사한 변화 추이를 보였다. 이 결과로부터, 적어도 전 지구 평균온도의 시공간적 비균질적인 특징이 전 지구 평균온도를 추정하는 데에는 큰 문제가 되지 않는음을 시공간적으로 균일한 해상도를 지닌 자료인 ERA20CR 자료와의 비교로부터 확인하였다.
- 2) NCEP20CR을 활용하여 계산된 전구평균 지상온도 추이의

경우, 앞선 두 자료에서 확인된 1940~1970년 시기의 온도 하강기 없이 계속 온도가 증가하는 경향성을 보여 재분석 자료별로 전구 평균 지상온도 추이가 다름을 확인하였다.

- 3) 모든 자료(HadCRU4, ERA20CR, ERA20CR Masked, NCEP-20CR)에서 적도 지역이 온도 변동이 가장 일치하는 것으로 확인되었다.
 - 4) ERA20CR 자료의 경우, 최근 30년 동안 HadCRU4 자료의 온도 상승폭에 비해 더 큰 온도 증가를 보이거나, 1900년대 초반부터 1940년대 중반까지는 HadCRU4 자료의 온도가 보다 큰 상승을 보여 자료 간 시기별 차이가 존재함을 확인하였다.
 - 5) 극지역 평균의 경우, HadCRU4자료는 극지역 자료의 희소성으로 인해 매우 큰 변동 특성을 보였으며, 이러한 큰 변동 특성은 공간적으로 균일한 해상도를 지닌 재분석 자료와의 비교를 통해 확인할 수 있었다. 따라서 HadCRU4 자료에 나타난 1900년대 초반의 극지역(60N~0N)의 강한 온난화는 자료가 비교적 많이 확보되어 있는 바렌츠 해 등에서 지역적으로 온도가 강하게 상승했을 가능성을 배제하지 못해 이 시기 극지역 지상기온의 급격한 상승이 이 지역에 국한된 자연변동일 가능성을 배제할 수 없다.
 - 6) NCEP20CR 자료의 경우에는 HadCRU4와 ERA20CR에 잘 나타나는 1940~1970년 온도 하강기가 존재하지 않아, 다른 자료들과 매우 다른 특성을 보임을 확인하였다. 이러한 차이는 사용한 입력자료의 차이 혹은 사용된 대기모델, 자료동화 기법에 차이에 기인할 수 있다.
- 이상 연구를 통해 1900년대 이후 전 지구 평균 지상 온도 변화 양상이 사용하는 자료에 따라 다를 수 있음을 확인하였

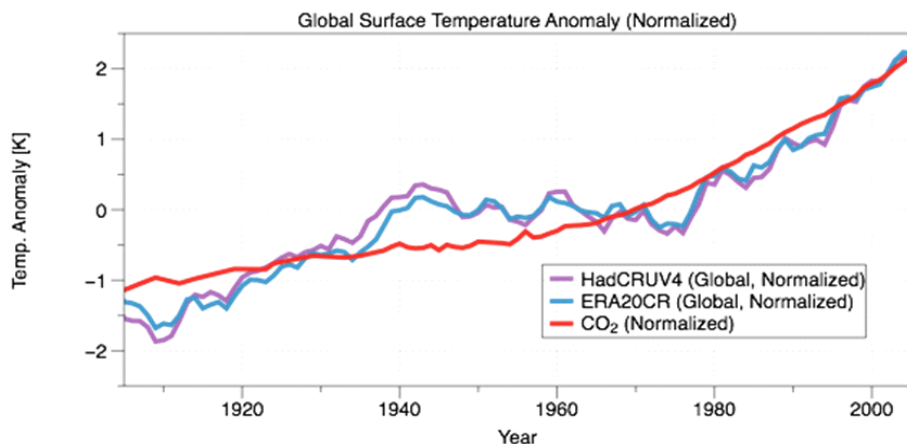


Fig. 9. Global averaged surface airtemperature and CO₂ from ERA20CR and HadCRU4 from 1900 to 2009. Temperature and CO₂ are normalized for comparison.

고, 따라서 산업혁명 이후 전 지구 평균 지상 온도 변화에 대한 추정에 있어 불확실성이 아직 크다는 것을 알 수 있다. 특히, 실측 자료만을 활용하는 HadCRU4 자료의 경우, 극지 자료의 희소성으로 인해 고위도 자료 해석에 큰 주의가 요구되고, 이로부터 1900년대 초반 북극의 고온 현상을 해석하는데 주의가 필요하다는 점을 확인하였다. NCEP20CR 자료와 ERA-20CR 자료의 경우, 사용한 입력자료에 있어 조금 차이가 있다. ERA20CR의 경우, 해수면온도, 해빙, 해면기압 이외에도 해상 바람장이 추가로 사용되었다. 이러한 차이점들이 자료 간 차이를 만들어 냈을 수 있으나, 본 연구에서 구체적으로 무엇 때문에 다른 특성이 생기는지를 확인하기는 어려웠다. 다만, 한 가지 주목할 만한 점은 NCEP20CR의 경우, 극지역의 경우 다른 자료들과 확연한 차이를 보였다. 특히, 1940~1970년의 경우, NCEP20CR 자료는 다른 자료에서 확인되는 극지역에서의 온도 감소 패턴이 전혀 나타나지 않았다.

종합하면, 여러 가지 자료들 간의 비교로부터 드러나는 불확실성은 주로 극지역에서 기인함을 확인하였다. 산업혁명 이후 지표온도 변화가 인간이 방출한 이산화탄소 증가에 어떻게 반응하는지를 이해하는가가 매우 중요함을 감안할 때, 과거, 현재의 극지역의 기후변동성의 정확한 추정에 대한 노력이 더욱 요청된다.

사 사

원고를 꼼꼼히 읽어주시고 논문의 질적 수준 향상에 큰 도움을 주신 세 분 심사위원분들께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 해양수산부의 해양안전 및 해양교통시설기술개발사업의 “선박배출 대기오염원(PM, BC) 기후변화 영향평가 및 저감기술 개발” 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Jones PD, Lister DH, Osborn TJ, Harpham C, Salmon M, Morice CP. 2012. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research* 117, D05127, doi:10.1029/2011JD017139
- Kennedy JJ, Rayner NA, Smith RO, Saunby M, Parker DE. 2011. Reassessing biases and other uncertainties in sea-surface temperature observations measured *in situ* since 1850 part 2: Biases and homogenization. *Journal of Geophysical Research* 116, D14104, doi: 10.1029/2010JD0-15220
- Kim B-M, Jung E-H, Lim G-H, Kim H-K. 2014. Study of atmospheric variability in association with the Arctic warming, *The Atmosphere*. (Under publication).
- Lean JL, Rind DH. 2008. How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophys Res Lett* 35(18), L18701, doi: 10.1029/2008GL034864
- Marcott SA, Shakun JD, Clark PU, Mix AC. 2013. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science* 339(6124):1198-201, doi:10.1126/science.1228026
- Morice CP, Kennedy JJ, Rayner NA, Jones PD. 2012. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 dataset. *Journal of Geophysical Research* 117, D08101, doi:10.1029/2011JD017187
- Osborn TJ, Jones PD. 2014. The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: Construction, previous versions and dissemination via Google Earth. *Earth System Science Data* 6:61-68, doi:10.5194/essd-6-61-2014
- Parker DE, Jones PD, Bevan A, Folland CK. 1994. Interdecadal changes of surface temperature since the 19th century. *J Geophys Res* 99:14373-14399.
- Screen JA, Simmonds I. 2010. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature* 464(7293):1334-1337. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1038/nature09051>
- Serreze MC, Barrett AP, Stroeve JC, Kindig DN, Holland MM. 2009. The emergence of surface-based Arctic amplification. *Cryosphere* 3(1):11-19.
- Thompson DWJ, Kennedy JJ, Wallace JM, Jones PD. 2008. A large discontinuity in the mid-twentieth century in observed global-mean surface temperature. *Nature* 453(7195): 646-649, doi:10.1038/nature06982
- Yang X, Hou Y, Chen B. 2011. Observed surface warming induced by urbanization in east China. *J Geophys Res* 116, D14113, doi:10.1029/2010JD015452
- Whitaker JS, Compo GP, Thepaut J-N. 2009. A comparison of variational and ensemble-based data assimilation systems for reanalysis of sparse observations. *Monthly Weather Review* 137, 1991-1999, doi:10.1175/2008MWR2781.1