장기 기온 경향의 연직분포에 관한 재분석자료들 간의 불일치

윤재승¹ · 정일웅¹ · 신상희² · 임창묵¹

¹강릉원주대학교 대기환경과학과 · ²강릉원주대학교 산학협력단

(2014년 1월 28일 접수, 2014년 2월 10일 수정, 2014년 2월 10일 게재 확정)

Discrepancies in the Vertical Profiles of Long-term Temperature Trends among Reanalyses

Jae-Seung Yoon¹ · Il-Ung Chung¹ · Sang-Hye Shin² · Chang-Mook Lim¹

¹Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University

²Industry Academy Cooperation Group, Gangneung-Wonju National University

(Received 28 January 2014, Revised 10 February 2014, Accepted 10 February 2014)

Abstract : Agreement in the vertical profiles of the temperature trends from radiosonde observation (HadAT) and four kinds of reanalysis dataset (ERA40, ERA-I, NCEP-DOE, and 20CR) are examined for the period of 1979-2000. There are noticeable spread among reanalysis and observation datasets in the temperature trend depending on region and vertical level. East Asia shows large discrepancy among datasets, while Europe shows relatively good agreement. Generally, biases in temperature trends are larger in the upper troposphere (above 300 hPa) than in the lower and middle troposphere. Comprehensive comparison of the long-term temperature trends among reanalyses is made for horizontal distributions with height, latitude-pressure cross-sectional distributions, zonally-averaged meridional distributions with height, and area-averaged vertical profiles in both DJF and JJA. Consequently, we find that the degree of agreement among reanalyses significantly varies with vertical level, region, and season. The highest discrepancy is found over southern high-latitudes and in the upper troposphere over southern tropics. In the tropical upper troposphere above 200 hPa, observation (HadAT) shows cooling trend increases with height, but three reanalyses show warming trends except NCEP-DOE reanalysis in which cooling trend is overestimated. In conclusion, discrepancies in the vertical profiles of long-term temperature trends among four kinds of reanalysis datasets are quite large, and then a scrupulous approach should be needed when reanalysis dataset is used for climate change study.

Key Words : reanalysis, temperature trend, vertical profile, climate change, warming

주요어 : 재분석자료, 기온 경향, 연직분포, 기후변화, 온난화

1. 서론

다양한 기후 강제들의 변화에 따른 기온의 장기적 변화 경향은 기후변화 과학 분야에서 가장 중요한 관심 대상이다. 지금까지 축적된 다양하고 방대한 관측자료는 지구 온난화의 명백한 증거를 제시하고 있으며, 미래 온실가스 증가 시나리오 하에서 기후 예측 모델들은 한결같이 기온 상승의 가속화를 전망하고 있다(IPCC, 2007). 특히 기후 모델을 이용한 연구가 활발해짐에 따라 다양한 미래 전망 정보가 생산되는 요즈음, 이들 연구 결과에 대한 신뢰성 확보는 매우 중요한 문제이기에 이 모델들의 검증에 있어 재분석자료의 활용 가치는 점점 더 높아지고 있다.

지금까지 대류권의 기온변화 경향에 관한 비교 연구는 주로 위성 관측자료를 검증하기 위한 수단으로 많이 수행되었다. 대부분 위성 관측자료와 재분석자료(Bassett and Chelliah, 1997; Pielke, 1998; Chase *et al.*, 2000; Chelliah and Ropelewski, 2000; Sturaro, 2003), 혹은 위성 관측자료와 라디오존데 관측자료(Bassett *et al.*, 1995; Hurrell *et al.*, 2000; Lanzante *et al.*, 2003; Vinnikov and Grody, 2003)를 비교한 연구가 주를 이루었으며 이 연구들의 목적은 대부분 위성자료의 신뢰성 확인을 위해 재분석자료와 라디오존데 관측자료를 기준으로 삼았다. 라디오존데 자료와 재분석자료를 비교한 연구는 지금까지 두 연구 결과만을 확인할 수 있었다(Agudelo and Curry, 2004; Davey *et al.*, 2008). 그러나 Agudelo and Curry(2004)의 연구는 라디오존데 자료와 재분석자료를 이용하여 대류권 기온변화 경향의 공간분포를 살펴봄으로써 온난화의 국지적인 차이를 살펴보는 것이었고, Davey *et al.*(2008)의 연구만이 재분석자료의 검증을 위한 비교 연구였다. Davey *et al.*(2008)은 재분석자료가 기후변화 경향 연구에 적절하다고

주장하였다. 이들은 1979–2001년 기간 동안 아메리카 대륙과 호주/오세아니아 육지에 대한 라디오존데 및 재분석자료를 이용하여 온도 변화 경향을 분석을 수행하였으며, 그 결과 평균적인 라디오존데자료의 경향이 평균적인 재분석자료의 경향들 사이에 존재함을 밝혔다.

그러나 최근의 여러 연구들은 기후자료 검증에 있어서 재분석자료들의 사용에 주의를 기울일 것을 제시하였다. IPCC(2007)에 따르면, ERA40 자료는 보정과정에 생기는 잔차 문제 때문에 기온의 장주기 변동에 대한 신뢰성이 떨어진다고 밝혔다. Vose *et al.*(2012)은 1979–2008년 기간 동안 북아메리카 지역에 대해 6종의 재분석자료들과 U.S. HCN(Historical Climatology Network) 자료의 지표 기온 변화 경향을 분석한 결과, 재분석자료들의 앙상블 평균 기온 경향과 보정된 HCN 자료의 기온 경향 간에 대체로 잘 일치함을 보였다. Simmons *et al.*(2004)은 ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts) 40년 재분석자료와 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석자료를 사용하여 CRU(Climatic Research Unit)의 CRUTEM2v 자료와 장기적 지표 기온 경향을 비교 분석한 결과, 전체 분석기간인 1958–2001년 동안 두 재분석자료의 선형 경향은 매우 낮게 나타났으나 1979년 이후 북반구에 대해 ECMWF 재분석자료는 10% 이내의 오차를 보였다. Thorne and Vose(2010)는 재분석자료가 장기적 기온 경향 연구에 활용할 수 있는 품질을 갖기 위해서는 문제점의 명확한 정의, 비기후적인 인공 결함을 최소화시키기 위한 방법론, 그리고 검증 자료 및 척도의 구축 등 재분석자료의 생산 전략에 대한 본질적인 재고가 요구된다고 밝혔다. 열대 대류권 상부 기온 경향에 있어 기후 모델 자료와 관측자료 간의 불일치에 관

한 논쟁은 여전히 진행중인데, Thorne *et al.* (2010)은 두 자료의 경향 간에 근본적인 불일치가 존재한다는 합리적 증거는 없다는 결론을 내린 반면, CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project phase 5) 모델들과 라디오존데 관측자료를 통해 이 불일치를 재평가한 Mitchell *et al.* (2013)은 지표 온도 경향의 미흡한 모의로 인해 열대 대류권 전체적으로 불일치가 존재함을 주장하였다.

이에, 본 연구에서는 장기적 기온변화 경향의 연직 분포에 관한 재분석자료들 간의 차이를 확인하고, 라디오존데 자료와의 비교 분석을 통해 장기적 기온변화 경향에 있어 재분석자료들의 품위를 검증하고자 한다. 또한 전구뿐 아니라 위도에 따른 국지적 경향 또한 살펴봄으로서 기후변화 연구에 활용되는 재분석자료들의 지역에 따른 특징을 파악하고자 한다.

2. 자료 및 연구 방법

이 연구에서 사용된 4종의 재분석자료는 ECMWF 40년 재분석자료(이하 ERA40; Uppala *et al.*, 2005), ECMWF Interim 재분석자료(이하 ERA-I; Dee *et al.*, 2011), NCEP/DOE(National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy) 재분석자료(이하 NCEP-DOE; Kanamitsu *et al.*, 2002), 그리고 NOAA(National

Oceanic and Atmospheric Administration) 20세기 재분석자료(이하 20CR; Compo *et al.*, 2011) 등이다. 이 재분석자료들의 수평 해상도는 위에 언급한 순서대로 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$, $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 그리고 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 이다(Table 1 참조). 이들의 자료 기간은 상이하지만, 이 연구에서는 1979년부터 2000년까지의 22년을 분석기간으로 삼았다.

재분석자료들의 검증을 위한 관측자료로는 영국 해들리기후센터에서 구축한 HadAT 라디오존데 자료(Thorne *et al.*, 2005)를 사용하였다. 이 자료는 850 hPa에서 30 hPa까지 9개의 표준 기압고도에서의 기온 아노말리로서 전 세계 676개의 라디오존데 관측지점 자료로부터 10° (경도) $\times$ 5° (위도) 해상도의 격자 자료로 만들어진 것이다. 아노말리는 1966–1995년의 30년 평균에 대비한 편차를 의미한다.

기온 변화 경향의 연직분포에 있어서 4종의 재분석자료들 간의 불일치를 조사하기 위하여 선형 회귀 분석을 수행함으로써 1000 hPa에서 100 hPa까지 각 기압면 기온의 추세 기울기를 계산하였다. 이 기울기에 대한 고도별 전지구 분포, 연직-자오 단면 분포, 그리고 고도별 동서-평균 자오 분포의 특징이 비교 분석되었으며, 아울러 여러 영역들(전지구, 반구, 고위도, 중위도, 열대 지역)에 대해 평균된 추세 기울기의 연직분포에 대해서도 비교 분석되었다. 불일치의 계절성을 확인하기 위하여 모든 분석은 북반구 겨울철(DJF)과 여

Table 1. Summary of the 4 kinds of reanalyses used in this study.

Name	Source	Period of Record	Resolution (Lon, $\times$ Lat.)	Assimilation Scheme
ERA40	ECMWF	1957–2002	$2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$	3DVAR
ERA-I	ECMWF	1979–2013	$1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$	4DVAR
NCEP-DOE	NCEP/DOE	1979–2013	$2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$	3DVAR
20CR	NOAA	1871–2012	$2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$	Ensemble Kalman Filter

름철(JJA)에 대해 이루어졌다.

3. 결과

1) 재분석자료 기온변화 경향의 검증

재분석자료들 간의 비교 분석을 통한 불확실성 평가에 앞서, 검증을 위해 라디오존데 관측망이 매우 조밀한 북반구 중위도의 세 지역, 즉 동아시아, 유럽, 그리고 북미 지역을 선택하여 재분석자료들과 HadAT 자료 간의 차이를 조사하였다. Figure 1에서 음영으로 칠해진 격자는 HadAT 자료가 존재하는 영역이다. 이 그림에서 상자를 그려 구별한 동아시아, 유럽, 그리고 북미 지역은 다른 지역에 비해 HadAT 자료가 조밀함을 알 수 있다.

먼저 재분석자료들과 HadAT 자료와의 차이를

살펴보기 위해, Figure 1의 세 지역에 대해 평균된 연직 기온분포 자료의 변화 추세 기울기를 산출하여 북반구 겨울철(DJF)과 여름철(JJA)에 대해 Figure 2와 Figure 3에 각각 나타냈다. 겨울철과 여름철, 세 지역 모두에서 대기 하층에서는 온난화가, 상층에서는 냉각화가 나타났다. 이는 상층대류권 및 하층 성층권 부근에서 기온 추세가 음의 값을 가진다는 Oort and Liu(1993)의 결과와도 일치한다. 유럽 지역에서 재분석자료들과 HadAT 자료 간의 일치가 좋은 편이며, 동아시아 지역에서는 자료들 간의 차이가 두드러진다. 북아메리카 지역에서는 하층 대기에서 자료들 간의 일치가 좋은 편이나, 고도가 높아질수록 자료들 간의 차이는 커졌다. 겨울철 상층대기의 냉각화가 다른 재분석자료들에 비해 HadAT에서 작게 나타났고(Figure 2c), 여름철의 경우 150–300 hPa 고도에서 온난화가 나타난 재분석자료들과 달리 HadAT

Figure 1. Data coverage of the global gridded radiosonde temperature anomaly dataset HadAT(shaded). 3 regions with dense data (boxes) are selected for the verification of temperature trends from reanalyses. Region A(21°N-49.5°N, 105°E-135°E) is for East Asia(EA), region B(36°N-66°N, 3.5°W-83.5°E) is for Europe(EU), and region C(28.5°N-48.5°N, 123°W-75°W) is for North America(NA).

(a)

(a)

(b)

(b)

(c)

(c)

Figure 2. Comparison of vertical profiles of the temperature trends averaged over EA region(a), EU region(b), and NA region(c) for boreal winter(DJF) for the period 1979-2000.

Figure 3. Same as Figure 2, but for boreal summer(JJA).

는 냉각화 추세를 보였다(Figure 3c). 우리나라가 포함된 동아시아 지역의 경우(Figure 2a와 Figure 2b) HadAT의 기온변화 경향 패턴이 다른 재분석 자료들보다 ERA40과 ERA-I와 유사하게 나타나 유럽과 북아메리카 지역에서는 특히 겨울철 보다 여름철(Figure 3b와 3c)에 자료들 간의 차이가 두드러진다. 흥미로운 점은 지역에 상관없이 하부 보다 상부 대류권에서의 자료들 간의 편차가 크게 나타났고, NCEP-DOE는 다른 재분석자료들 보다 큰 냉각화의 모습을 보였다. 이처럼 관측망이 조밀한 북반구 동아시아, 유럽, 북미 지역에 대해 비교 분석한 결과, 재분석자료들과 HadAT 자료 간에 유의한 차이가 존재하며, 4종의 재분석 자료들 간에도 뚜렷한 차이를 보이고 있다.

2) 재분석자료들 간의 기온변화 경향 비교

기온 경향에 있어서 재분석자료들의 불확실성을 좀 더 자세히 살펴보기 위해, 기온변화 경향의 고도별 공간분포를 비교 분석하였다. 먼저 800 hPa, 500 hPa, 그리고 200 hPa 고도에서 나타나는 기온변화 경향의 공간 분포를 북반구 겨울철(DJF)과 여름철(JJA)에 대해 살펴보았다(Figure 4와 Figure 5). 대기 하층(850 hPa)에서 북반구 여름철(JJA)에서의 온난화 경향이 겨울철(DJF)보다 더욱 뚜렷함을 알 수 있다. 그러나 자료들 간

의 패턴의 차이는 존재하는데, ERA40과 20CR이 ERA-I와 NCEP-DOE보다 기온 증가 추세 지역이 많이 분포되어 있으며, 자료들 간의 차이는 대부분 적도 부근과 남반구에서 두드러지게 나타난다. 500 hPa 고도에서는 두 계절 모두 다른 재분석자료들보다 20CR에서 온난화 경향이 더 넓은 지역에서 나타난다. 그러나 적도 부근과 남반구에 나타나던 다른 세 재분석 자료들 사이의 차이는 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 상층(200 hPa)에서 나타나는 재분석자료들의 공간패턴은 더욱 흥미롭다. NCEP-DOE를 제외한 다른 세 재분석자료에서, 양반구의 고위도 지역에서는 냉각화가, 열대를 중심으로 하는 저위도 지역에서는 온난화 경향이 뚜렷하게 나타난다. 한 가지 더 흥미로운 점은, 북반구 여름철(JJA) 동안 ERA-I의 열대 태평양 지역을 중심으로 나타나는 냉각화 경향이다.

북반구 대기 하층 공간분포에서 확인할 수 있는 재분석 자료들 간의 일치는 분명히 이용하는 관측자료가 풍부한 데서 기인한다. 따라서 관측자료가 부족한 남반구 지역과 대기 상층에서 보이는 재분석자료들 간의 차이는 재분석자료들이 사용하는 초기장과 모델의 특징을 반영한다고 볼 수 있다.

Figure 4와 Figure 5에서 보인 고도에 따른 재

Table 2. Correlation coefficient matrices for the spatial patterns of temperature trends at 3 vertical levels(850, 500, and 200 hPa) between two different reanalyses for DJF and JJA.

	DJF			JJA		
	850 hPa	500 hPa	200 hPa	850 hPa	500 hPa	200 hPa
20CR vs ERA40	0.54	0.31	0.86	0.21	0.35	0.47
20CR vs ERA-I	0.65	0.85	0.86	0.42	0.59	0.48
20CR vs NCEP-DOE	0.61	0.76	0.87	0.15	0.43	0.09
ERA40 vs ERA-I	0.82	0.64	0.96	0.73	0.81	0.77
ERA40 vs NCEP-DOE	0.57	0.32	0.90	0.80	0.82	0.44
ERA-I vs NCEP-DOE	0.78	0.74	0.96	0.63	0.68	0.69

Figure 4. Distributions of 850 hPa(a), 500 hPa(b), and 200 hPa(c) temperature trends (in $^{\circ}\text{C}/\text{decade}$) for boreal winter(DJF) for the period 1979-2000 from four kinds of reanalysis dataset. Areas with negative value(that is, cooling trend) are shaded.

Figure 5. Same as Figure 4, but for boreal summer(JJA).

분석자료들 간의 차이를 간단히 수치화하기 위해 재분석자료들 간의 공간 패턴 상관계수를 구해 Table 2에 제시하였다. 겨울철 200 hPa 고도에서 ERA40과 ERA-I 간의 공간패턴의 상관계수가 약 0.96으로 가장 높게 나타났다. 이는 ERA40과 ERA-I가 유사한 모델 기반이기 때문으로 사료된다. 이 두 자료 간의 상관계수는 계절과 고도에 상관없이 전반적으로 상당히 높은 값을 보인다. 재분석자료들 간에 가장 유사한 공간 패턴은 북반구 겨울철(DJF)에 200 hPa 고도에서 나타나는데, 가장 낮은 상관성을 갖는 20CR과 ERA40 간에도 약 0.86의 높은 상관계수를 보인다. 이것은 북반구 여름철(JJA)에 가장 높은 상관성을 갖는 ERA40과 NCEP-DOE 간의 상관계수(약 0.82)보다도 높은 수준이다. 20CR과 다른 재분석자료들 간의 차이는 특히 북반구 여름철에 두드러지

며, NCEP-DOE와의 상관성은 매우 떨어져 200 hPa 고도에서의 상관계수는 약 0.09에 불과하다.

Figure 4와 Figure 5에서 나타난 공간패턴 분석을 통해 기온변화 경향의 위도에 따른 차이도 확인하였다. 이를 좀 더 자세히 살펴보기 위해 북반구 겨울철(DJF)과 여름철(JJA) 동안 동서평균 기온변화 경향의 연직분포를 Figure 6과 Figure 7에 보였다. 재분석자료들 간의 차이가 뚜렷하게 나타나며 그 특징은 Figure 4와 Figure 5에서 나타난 양상과 흡사하다. 북반구 겨울철(Figure 6)에서 재분석자료들 간의 차이는 남반구와 열대 지역에서 두드러지게 나타난다. 다른 재분석자료들과 달리 ERA40은 남극 중하층 대기에서 온난화 패턴을 보이고, NCEP-DOE는 열대 상층대기에서 기온감소추세를 나타내며, 20CR은 열대 하층대기에서 온난화 경향을 보인다. 북반구 중위도 지

Figure 6. Latitude-pressure cross-sections of zonally-averaged temperature trends (in °C/decade) for boreal winter (DJF) for the period 1979-2000 from four kinds of reanalysis dataset: ERA40(a), ERA-Interim(b), NCEP-DOE(c), and 20CR(d). Areas with negative value(that is, cooling trend) are shaded.

Figure 7. Same as Figure 6, but for boreal summer(JJA).

Figure 8. Zonally-averaged temperature trends (in °C/decade) at 5 pressure levels (1000, 700, 500, 200, 100 hPa) for DJF(a) and JJA(b) for the period 1979-2000 from four kinds of reanalysis dataset and observation (HadAT). Thick solid line represents a mean of reanalyses.

역에 대해서는 4종의 재분석자료 모두 하층에서는 온난화를 상층에서는 냉각화를 잘 나타내고 있으며, 북극에서는 온난화가 지배적인 모습을 잘 보인다. 이는 Graversen *et al.* (2008)과 Alexeev *et al.* (2012)에서 ERA40, JRA-25, 그리고 NCEP-1 재분석자료에서 북극지역의 온난화 모습을 보인 결과와도 잘 일치한다.

북반구 여름철(Figure 7)은 열대지역에서 재분석자료들 간의 차이가 뚜렷하고 고위도 지역에서

는 유사한 패턴을 보인다. 양극 지역에서 하층에서는 온난화가, 상층에서는 냉각화가 지배적인 양상이 나타나는 등 자료들 사이에서 유사한 특징이 나타나나 열대지역에서는 상층과 하층 모두에서 자료들 간의 차이가 분명하며, 특히 20CR 자료는 열대 대기 전체에 걸쳐 온난화 경향이 우세한 모습을 보이는 등 다른 세 재분석자료들과는 현저하게 다른 양상을 보인다.

그러나 흥미롭게도 연직 공간패턴에서 재분석

Figure 9. Comparison of vertical profiles of the temperature trends (in $^{\circ}\text{C}/\text{decade}$) averaged over the both Hemispheres (left panels for Northern Hemisphere and right panels for the Southern Hemisphere) for DJF (upper panels) and JJA (lower panels) for the period 1979-2000 from four kinds of reanalysis dataset and HadAT.

자료들 간의 유사성이 나타난 극지역에서, 온난화 경향의 크기 차이가 두드러진다(Figure 8). 겨울철(DJF)과 여름철(JJA) 공히 대기 전 층에 걸쳐 양 극지역에서 재분석자료들의 차이가 두드러지며, 상층으로 갈수록 그 차이는 더욱더 벌어지며 양극 뿐 아니라 전체 위도대에 걸쳐, 특히 적도를 중심으로 차이가 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다.

이처럼 위도대에 따라 나타나는 재분석자료들의 불확실성을 좀 더 자세히 살펴보기 위해 북반구와 남반구, 고위도(60° – 90°), 중위도(30° – 60°), 그리고 열대지역(0° – 30°)로 영역을 구분하여, 각

영역에서 나타나는 온난화 경향의 연직 분포를 Figure 9–12에 차례대로 보였다.

DJF 동안 북반구(Figure 9a)의 250 hPa 이하의 고도에서 기온변화 경향의 크기나 패턴이 서로 유사한 반면, 남반구(Figure 9b)에서는 자료들 간의 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 북반구에서도 대기 상층으로 갈수록 자료들 간의 차이가 커지며 이는 JJA에 대한 연직분포에서도 확인할 수 있다(Figure 9c와 d).

고위도 지역에서 나타난 온난화 경향의 연직분포(Figure 10)의 경우 북반구에서 보다 남반구에

Figure 10. Same as Figure 9, but for the high-latitudes (left panels for 60° N– 90° N and right panels for 60° S– 90° S).

서 더욱 뚜렷하게 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다. 고위도 지역에서는 DJF와 JJA 모두 북반구에서 자료들 간의 차이가 그리 크지 않은 반면(Figure 10a와 c) 남반구에서는 그 차이가 상당히 크게 나타난다(Figure 10b와 d). ERA40 자료는 남반구 DJF에서 다른 자료들에 비해 하층 냉각화가 과소 묘사하고 상층 냉각화는 과대 묘사하는 반면 JJA에서는 다른 자료들에 비해 HadAT 자료와 유사한 패턴을 보였다.

중위도 지역의 기온 경향 연직분포(Figure 11)은 각 반구 평균의 연직분포(Figure 9)와 가장 유

사한 패턴을 가진다. 중위도 역시 북반구(Figure 11a와 c)보다 남반구(Figure 11b와 d)에서, 대기 하층보다 상층에서 자료들의 불확실성이 커짐을 알 수 있다.

계절성이 약한 열대의 경우(Figure 12)는 계절이나 반구적 특성이 반영된 차이보다는 고도에 따른 불확실성을 확인할 수 있으며 자료들 간의 차이 역시 중위도 지역이나 각 반구 평균에 비해 더 크게 나타난다. 특히 20CR 자료는 고도에 따라 온난화와 냉각화가 구분되는 다른 자료들과 달리 열대 대기 전층에 있어서 온난화 양상을 보인다.

Figure 11. Same as Figure 9, but for the mid-latitudes (left panels for 30°N-60°N and right panels for 30°S-60°S).

Figure 12. Same as Figure 9, but for the tropics (left panels for 0°-30°N and right panels for 0°-30°S).

또한 상층 대기에서 ERA40과 ERA-I, 20CR은 뚜렷한 온난화 경향을 보이는데 반해 NCEP-DOE와 HadAT 자료는 냉각화가 지배적이다.

4. 결론 및 토의

이 연구에서는 4종의 재분석자료들(20CR, ERA40, ERA-I, 그리고 NCEP-DOE) 및 HadAT 라디오존데 관측 자료를 이용하여 22년 기간에 걸

쳐 일어난 기온변화 경향의 연직 분포를 비교 분석하였다. 연직 기압면(1000-100 hPa) 기온에 대해 선형 회귀 분석을 수행함으로써 그 변화 추세 기울기의 전지구 3차원 분포를 구축하여, 남반구와 북반구(0°-90°N, 0°-90°S) 및 열대지역(0°-30°N, 0°-30°S), 중위도 지역(30°N-60°N, 30°S-60°S), 그리고 고위도 지역(60°N-90°N, 60°S-90°S)에 대해 각각 계절별로 추세 기울기의 평균을 산출함으로써 기온변화 경향 연직분포의 지역성 및 계절성을 상호 비교하였다.

1979–2000년까지의 관측망이 매우 조밀한 북반구 중위도의 세 지역, 즉 동아시아, 유럽, 그리고 북아메리카 지역을 선택하여 평균된 연직 기온분포 자료의 변화 추세 기울기를 산출하여 겨울철(DJF)과 여름철(JJA)에 대해 재분석자료들과 HadAT 자료 간의 차이를 조사한 결과 재분석자료들과 HadAT 자료 간의 차이가 존재하며, 4종의 재분석자료들 간에도 뚜렷한 차이를 보이는 것을 확인하였다. 특히 NCEP-DOE는 다른 재분석자료들 보다 큰 냉각화의 모습을 보였다.

고도에 따른 기온변화 경향의 공간 분포에서는 하부 대류권(850 hPa)에서 북반구 여름철(JJA)의 온난화 경향이 겨울철(DJF) 보다 더욱 뚜렷하게 나타난다. 상부 대류권(200 hPa)에서 나타나는 재분석자료들의 공간패턴은 더욱 흥미롭다. NCEP-DOE를 제외한 다른 세 재분석자료에서, 양반구의 고위도 지역에서는 냉각화가, 열대를 중심으로 하는 저위도 지역에서는 온난화 경향이 뚜렷하게 나타난다.

이러한 재분석자료들 간의 차이는 북반구와 남반구, 고위도(60° – 90°), 중위도(30° – 60°), 그리고 열대지역(0° – 30°)으로 영역을 나누어 살펴볼 때 더욱 분명하게 확인할 수 있다. 관측망이 남반구 보다 많은 북반구의 경우 재분석자료들 간의 편차가 훨씬 작은 것으로 나타났으며, 특히 북반구 중위도에서는 비교적 작은 편차를 보였다. 그러나 상층 대기에서 ERA40과 ERA-I, 20CR은 뚜렷한 온난화 경향을 보이는데 반해 NCEP-DOE와 HadAT 자료는 냉각화가 지배적이다. 또 다른 재분석자료들 사이에 나타나는 현저한 차이는 상부 대류권에서 확인할 수 있는데, 심지어 추세의 부호가 반대로 나타나기도 하였다. HadAT 자료와 비교할 때, 대체적으로 ERA-I와 NCEP-DOE가 ERA40과 20CR에 비해 더 나은 질을 보여 주지만, 모든 계절과 모든 지역에 예외 없이 이것이 타

당한 것은 아니다. 관측자료가 풍부한 북반구 대기하층 공간분포에서는 재분석자료들 간의 차이가 작은 반면, 남반구 지역과 대기 상층에서는 자료들 간의 차이가 뚜렷하다. 이는 재분석자료 생산에 이용된 관측자료의 부족과 각각의 재분석자료들이 사용하는 모델의 특징을 반영한다고 볼 수 있다. 따라서 지역, 고도, 그리고 계절에 따라 정량적, 정성적으로 모두 불확실성이 매우 크기 때문에, 재분석자료를 사용하여 장기적인 기온의 변화를 연구할 때에는 매우 신중한 주의가 필요하다.

사사

유익한 조언과 비판을 해주신 익명의 심사자에게 깊이 감사드립니다. 이 논문은 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화 사업(APCC-2013-3150)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- Agudelo, P. A. and Curry, J. A., 2004, Analysis of spatial distribution in tropospheric temperature trends, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L22207, doi:10.1029/2004GL020818.
- Alexeev, V. A., Esau, I., Polyakov, I. V., Byam, S., and Sorokina, S., 2012, Vertical structure of recent arctic warming from observed data and reanalysis products, *Climatic Change*, 111, 215–239.
- Bassett, A. N., Ropelewski, C. F., and Grody, N. C., 1995, Comparison of tropospheric temperature derived from the Microwave Sounding Unit and the National Meteorological Center analysis, *J. Climate*, 8, 668–681.

- Bassett, A. N. and Chelliah, M., 1997, Comparison of tropospheric temperatures derived from the NCEP/NCAR reanalysis, NCEP operational analysis, and the Microwave Sounding Unit, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78(7), 1431-1447.
- Chase, T. N., Pielke, Sr. R. A., Knaff, J. A., Kittel, T. G. F., and Eastman, J., 2000, A comparison of regional trends in 1979-1997 depth-averaged tropospheric temperatures, *Int. J. Climatol.*, 20, 503-518.
- Chelliah, M. and Ropelewski, C. F., 2000, Reanalyses-based tropospheric temperature estimates: Uncertainties in the context of global climate change detection, *J. Climate*, 13, 3187-3205.
- Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., Matsui, N., Allan, R. J., Yin, X., Gleason, B. E., Vose, R. S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R. I., Grant, A. N., Groisman, P. Y., Jones, P. D., Kruk, M. C., Kruger, A. C., Marshall, G. J., Maugeri, M., Mok, H. Y., Nordli, Ø., Ross, T. F., Trigo, R. M., Wang, X. L., Woodruff, S. D., Worley, S. J., 2011, The Twentieth Century Reanalysis Project, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137(654), 1-28, DOI:10.1002/qj.776.
- Davey, C. A., Pielke, Sr. R. A., and Chase, T. N., 2008, Annual and seasonal tropospheric temperature trend comparisons of radiosonde and reanalysis data at regional scales, *National Weather Digest*, 32, 1-9.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, P. A., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. N., Vitart, F., 2011, The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137(656), 553-597.
- Graversen, R. G., Mauritsen, T., Tjemstrom, M., Kalten, E., and Svensson, G., 2008, Vertical structure of recent Arctic warming, *Nature*, 451, 53-56.
- Hurrell, J. W., Brown, S. J., Trenberth, K. E., and Christy, J. R., 2000, Comparison of tropospheric temperatures from radiosondes and satellites: 1979-1998, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 2165-2177.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (des.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J. J., Fiorino, M., and Potter, G. L., 2002, NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1631-1643.
- Lanzante, J. R., Klein, S. A., and Seidel, D. J., 2003, Temporal homogenization of monthly radiosonde temperature data. Part II: Trends, sensitivities, and MSU comparison, *J. Climate*, 16, 242-262.
- Mitchell, D. M., Thorne, P. W., Stott, P. A., and Gray, L. J., 2013, Revisiting the controversial issue of tropical tropospheric temperature trends, *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50465.
- Oort, A. H. and Liu, H., 1993, Upper-air temperature trends over the Globe, 1958-1989, *J. Climate*, 6, 292-307.
- Pielke, Sr. R. A., 1998, Climate prediction as an initial

- value problem, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2743-2746.
- Simmons, A. J., Jone, P. D., da Costa Bechtold, V., Beljaars, A. C. M., Källberg, P. W., Saarinen, S., Uppala, S. M., Viterbo, P., Wedi, N., 2004, Comparison of trends and low-frequency variability in CRU, ERA-40, and NCEP/NCAR analyses of surface air temperature, *J. Geophys. Res.*, 109, D24115, doi:10.1029/2004JD005306.
- Sturaro, G., 2003, Patterns of variability in the satellite microwave sounding unit temperature record: Comparison with surface and reanalysis data, *Int. J. Climatol.*, 23, 1799-1820.
- Thorne, P. W., Parker, D. E., Tett, S. F. B., Jones, P. D., McCarthy, M., Coleman, H., and Brohan, P., 2005, Revisiting radiosonde upper-air temperatures from 1958 to 2002, *J. Geophys. Res.*, 110, D18105, doi:10.1029/2004JD005753.
- Thorne, P. W., Lanzante, J. R., Peterson, T. C., Seidel, D. J. and Shine, K. P., 2010, Tropospheric temperature trend: History of an ongoing controversy, *Wiley Intreidi. Rev.: Climate Change*, 2(1), 66-88, doi: 10.1002/wcc.80
- Thorne, P. W. and Vose, R. S., 2010, Reanalyses suitable for characterizing long-term trends: Are they really achievable?, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 353-361.
- Uppala, S. M., Källberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., Van De Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B. J., Isakesn, L., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., Mcnally, A. P., Mahfouf, J. F., Morcrette, J. J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Steri, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J., 2005, The ERA-40 Reanalysis, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 2961-3012.
- Vinnikov, K. Y. and Grody, N. C., 2003, Global warming trend of mean tropospheric temperature observed by satellites, *Science*, 302, 269-272.
- Vose, R. S., Applequist, S., Menne, M. J., Williams Jr., C. N., and Thorne, P., 2012, An intercomparison of temperature trends in the U.S. Historical Climatology Network and recent atmospheric reanalyses, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L10703, doi: 10.1029/2012GL051387.