

항공기 온도 관측 자료의 편향 보정 Part I: 존데와 비교를 통한 온도 편향 특성 분석

권희내* · 강전호 · 권인혁

(재) 한국형수치예보모델개발사업단

(접수일: 2018년 7월 27일, 수정일: 2018년 9월 24일, 게재확정일: 2018년 9월 29일)

Bias Correction for Aircraft Temperature Observation Part I: Analysis of Temperature Bias Characteristics by Comparison with Sonde Observation

Hui-nae Kwon*, Jeon-ho Kang, and In-Hyuk Kwon

Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS), Seoul, Korea

(Manuscript received 27 July 2018; revised 24 September 2018; accepted 29 September 2018)

Abstract In this study, the temperature bias of aircraft observation was estimated through comparison with sonde observation prior to developing the temperature bias correction method at the Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS). First, we tried to compare aircraft temperature with collocated sonde observations at 0000 UTC on June 22, 2012. However, it was difficult to estimate the temperature bias due to the lack of samples and the uncertainty of the sonde position at high altitudes. Second, we attempted a background innovation comparison for sonde and aircraft using KIAPS Package for Observation Processing (KPOP). The one month averaged background innovation shows the aircraft temperature have a warm bias against sonde for all levels. In particular, there is a globally distinct warm bias about 0.4 K between 200 hPa and 300 hPa corresponding to flight level. Spatially, most of the areas showed the warm bias except for below 300 hPa in some part of China at 0000 and 1200 UTC and below 850 hPa in Australia at 0000 UTC. In general, the temperature bias was larger at 1200 UTC than 0000 UTC. Based on the estimated temperature bias, we have applied the static bias correction method to the aircraft temperature observation. As a result, the warm bias of the aircraft temperature has decreased at most levels, but a slight cold bias has occurred in some areas.

Key words: Aircraft, temperature, warm bias, bias correction, background innovation

1. 서 론

항공기 관측은 상대적으로 저렴한 비용으로 상층 대기의 온도, 바람, 습도 및 기압 상태를 제공하는 중요한 고품질 관측자료이다. 특히 Aircraft Communication

Addressing and Reporting System (ACARS)와 Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) System을 기반으로 항공기 관측의 범위와 자료의 수가 크게 증가하였는데, 현재 World Meteorological Organization (WMO) 전지구 AMDAR 관측시스템을 통해 하루에 700,000 개 이상의 고품질 관측 자료가 생산되고 있다(WMO, 2017). 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF)는 현업 자료동화 시스템에서 항공기 관측으로부터 더 많은 연직 관측 정보를 활용할 수 있도록 자료처리 과정을 개선하였

*Corresponding Author: Hui-nae Kwon, Data Assimilation Team, Development Division, Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS), 35, Boramae-ro 5-gil, Dongjak-gu, Seoul 07071, Korea.
Phone: +82-2-6959-1648, Fax: +82-2-6919-2121
E-mail: hn.kwon@kiaps.org

는데, 그 결과 상층 제트스트림의 예보정확도 향상은 물론 단기와 중기 예보 성능 또한 향상된 것으로 나타났다(Cardinali et al., 2003). 또한 Petersen (2016)은 항공기의 바람과 기온 관측 자료는 단기 전구 수치예보모델에서 세 번째로 중요한 자료이며, 지역 모델에서 가장 중요한 단일 자료라고 밝혔다.

이렇게 유용한 관측임에도 불구하고 항공기 온도 관측 자료에는 항공기 운항 상태에 따라 차이는 있지만 대체로 양의 편향(Bias)이 있는 것으로 알려져 있다. Schwartz and Benjamin (1995)은 미국 콜로라도 덴버 부근의 항공기 기온 관측으로부터 0.59°C의 기온 표준편차 및 항공기 운항 유형에 따라 이륙 후 운항고도까지의 상승구간에서 약한 양의 편향, 운항고도에서 착륙시점까지의 하강구간에서 강한 음의 편향이 존재함을 밝혔다. 또한, 미국 서부와 중부 지역에서 항공기 관측 기온의 오차가 0.5 K임을 밝혔다(Benjamin et al., 1999). Cardinali et al. (2003)은 북미와 유럽에서 라디오존데 자료와 비교하여 항공기 온도자료에 포함된 양의 편향을 밝혀냈다. 연구범위를 전구 영역으로 넓힌 Ballish and Kumar (2006)의 연구에서도 항공기 온도 자료는 250 hPa에서 라디오존데에 비해 약 0.5°C 정도의 양의 편향이 확인되었다. 국내에서는 Park and Kim (2002)의 연구에서 동아시아 영역에 대한 ACARS 기온이 라디오존데보다 1~1.5°C 정도의 오차(Root Mean Square Error; RMSE)를 가짐을 밝혔고, 국립기상과학원은 한반도 지역에 대한 AMDAR의 특성 분석과 검증을 수행한 바 있다. 하지만 아쉽게도 국내 선행 연구들의 범위는 동아시아 영역에 국한되어 있었고 전지구 항공기 온도 자료의 편향 특징에 대한 연구는 찾아보기 어려웠다.

이러한 항공기 온도 관측에 양의 편향이 나타나는 요인으로 여러 가지가 언급되고 있다. Painting (2003)은 AMDAR의 계산된 기온에 대한 불확실성이 약 0.25°C 정도라고 하였다. Ballish and Kumar (2006)는 온도 측정기의 디자인과 노출 정도, 관측 자료 처리 방법이 항공기 온도 관측의 양의 편향을 유도한 원인이라고 언급하였고, 더불어 연구 자료로 사용한 라디오존데의 음의 편향에 대한 원인 중 일부를 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 수행한 복사 보정(Collins, 1999)에 두고 있다. Schwartz and Benjamin (1995)는 항공기 운항 상태에 따른 온도 관측 오차 요인을 항공기 상승과 하강 시의 비행 속도 차이, 항공기의 받음각(Angle of attack) 차이, 하강 시의 습윤 효과(Humidity effect)와 응결 효과(Condensation effect) 등의 가능성들로 추정하고 있다.

선진 현업기관들에서 이와 같은 항공기 관측 온도의 편향을 변분 편향 보정(Variational bias correction; VarBC) 방법이나 정적 편향 보정 방법(Static bias

correction scheme)을 이용하여 보정하고 있다. 캐나다 기상청(Environment Canada)은 2009년 1월 한 달 동안 항공기 자료를 제외한 자료동화 실험(Denial experiment)과 항공기 자료를 포함한 기준 실험의 분석장(Analysis) 온도 차이를 이용하여 4개 연직 구간에 대해 항공기 온도 편향을 분석하였고 이를 기반으로 한 편향보정 방안을 현업예측시스템에서 활용하고 있다. 100~300, 300~400, 400~500, 500~700 hPa의 4개 구간에 대한 편향보정 계수는 각각 0.5, 0.3, 0.2, 0.1 K이며, 관측 온도에서 보정계수 만큼 감소시키는 방향으로 편향보정을 수행한다(Buehner et al., 2015). 일본 기상청(Japan Meteorological Agency)은 항공기 별로 온도의 관측 값(Observation; O)에서 관측위치로 내삽된 모델 배경장 값(Background; B)을 뺀 관측증분(O-B, i.e., Background innovation)에 따라 한 달 관측증분의 평균값이 2.5 K 이상이면 다음 달부터 해당 항공기의 자료는 사용하지 않는다(Sako, 2010). 독일 기상청(Deutscher Wetterdienst)에서 시행하고 있는 항공기 온도 편향 보정 방법은 모든 항공기와 비행 상태(Flight phases)에 대하여 계산된 관측증분 통계를 기반으로 특정 기간에 대한 편향의 평균을 계산하여 실제 기온 관측 값에서 편향 평균 값을 빼는 것으로 확인되었다. 그러나 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration)은 항공기 온도 자료에 양의 편향의 존재를 인지하고 있지만 편향 보정을 하지 않는 것으로 확인되었다.

한국형수치예보모델개발사업단(Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems; KIAPS)은 KIAPS 관측 자료 전처리 시스템(KIAPS Package for Observation Processing; KPOP, Kang et al., 2018)의 일환으로 고품질의 항공기 관측자료를 자료동화 시스템에 제공하기 위하여 품질검사와 슈아내기 등을 수행하는 항공기 관측자료 전처리 및 품질검사 시스템을 개발하였다. Ha et al. (2015)은 KPOP을 통해 전처리된 항공기 관측 자료를 KIAPS에서 개발한 3차원 변분(Three-Dimensional Variational; 3DVAR) 자료동화 기법에 적용하는 실험을 수행하였다. 그 결과, 항공기의 주요 운항경로에 해당하는 약 200 hPa 부근의 상공에서 분석장 정확도 및 예보의 성능이 개선됨을 확인하였다. KIAPS에서 개발한 전지구모델(Korean Integrated Model; KIM, Hong et al., 2018)과 KIM을 위한 자료동화 시스템의 성능이 고도화 되어감에 따라 항공기 관측 자료의 품질 개선을 위한 노력으로 관측 편향 보정 모듈 개발의 필요성이 대두되고 있다. 현재 KIAPS에서는 항공기 온도 자료의 편향 보정과 관련한 연구가 미비한 상황이다.

본 연구에서는 항공기 관측 온도 자료의 편향보정 모듈을 개발하기 위한 기초 정보를 확보할 목적으로

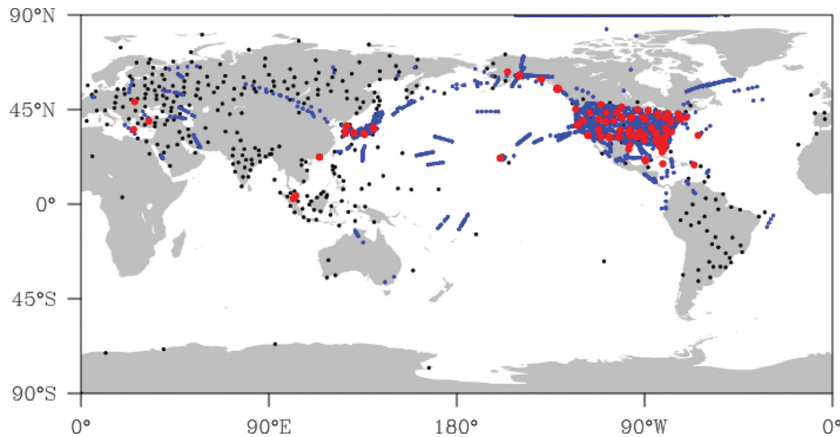


Fig. 1. Distribution of positions collocated sonde and aircraft temperature observations at 0000 UTC on June 22, 2017. Black and blue dots mean positions of sonde temperature observations at analysis time and aircraft temperature observations within ± 30 minutes from analysis time respectively. Red dots mean positions of sonde and aircraft observations collocated out of black and blue dots.

2단계에 걸쳐 라디오존데 관측자료와 항공기 관측자료의 비교를 통해 항공기 관측자료의 시·공간적 편향 특성을 분석하였다. 2장에서는 1단계 분석방안으로, 라디오존데와 항공기 관측 자료의 시·공간 일치치를 통한 직접비교 방안을 소개한다. 3장에서는 분석 기간을 1개월로 확장하고 라디오존데와 항공기 관측 각각의 평균 관측증분을 시간과 연직 구간에 따라 비교함으로써 항공기 관측 온도의 편향 특성을 분석한 2단계 분석 방안을 소개한다. 4장은 3장에서 계산된 항공기 온도 편향을 토대로 편향 보정한 결과를 확인하고, 마지막으로 5장에서 결론을 논할 것이다.

2. 시·공간 일치 분석

2.1 자료 및 방법

분석에는 KPOP을 통해 품질검사와 슈아내기로 처리된 존데와 항공기의 기온 관측 자료를 활용하였다. KPOP에서 사용되는 입력자료는 한국 기상청(Korea Meteorological Administration) 현업예보에 사용되는 관측 자료와 동일하다. 기상청의 항공기 관측 자료는 AMDAR와 AIREP (Aircraft REPort)을 포함하고 있으며, AMDAR 자료가 항공기 관측 자료의 대부분을 차지하고 있다. 사용된 존데 자료 또한 기상청 현업예보에 사용되는 자료와 동일한 것으로 기상청은 GTS (Global Telecommunication System)를 통해 입수된 기상전문형태의 존데 자료를 사용한다. GTS로부터 입수되는 기상전문자료에는 관측지점에 대한 관측 시작 시간과 위치 정보만 포함되어 있고 각 관측 값에 대한 시간과 위치 정보는 포함되어 있지 않다.

본 연구에서는 항공기 온도와의 비교를 위해 기준 자료로 존데 관측 자료를 이용하였다. Cardinali et al. (2003)와 Ballish and Kumar (2006)에서도 존데와 항공기 온도를 비교한 바 있고, 현재 사용하는 관측 자료 중 참값(True state)에 가장 가까운 자료가 존데라고 판단되었기 때문이다.

존데와 항공기 온도 관측 자료의 직접적인 비교를 위해 먼저 두 자료의 시·공간을 일치시킨 분석을 시도하였다. 사례는 모델이 수행된 기간 중 2017년 6월 22일 0000 UTC로 선정하였다. 해당 사례의 자료는 분석시각을 기준으로 ± 3 시간 안에 관측된 총 28,449개의 존데 온도 자료와 26,477개의 항공기 온도 자료이다. 이 중 분석시각에 해당하는 존데 온도 관측 값(21,151개)과 분석시각과의 차이가 ± 30 분 이내에 속하는 항공기 온도 관측 값(3,198개) 중 존데 지점 위치를 기준으로 존데와 항공기 관측 값의 위·경도 차이가 $\pm 0.5^\circ$ 이내이며, 두 관측 값의 기압 차이가 ± 5 hPa 이내인 179개의 존데와 항공기 온도 자료를 사용하였다(Fig. 1).

2.2 분석 결과

선정된 사례의 존데와 항공기 두 온도 관측 값의 차이와 그 차이를 10 hPa 간격으로 연직 평균한 값, 그리고 온도 관측증분 차이에 대해 10 hPa 간격으로 연직 평균한 값을 살펴보았다(Fig. 2). 300 hPa 이상에서 비교적 음의 분포가 많은 것을 볼 수 있는데 이는 항공기의 온도가 존데보다 더 높다는 것을 말한다. 하지만 전 고도에서 기온 차이가 1 K 이상으로 큰 값이 많이 분포하였고, 고도별 평균 값은 어느 한 쪽으로

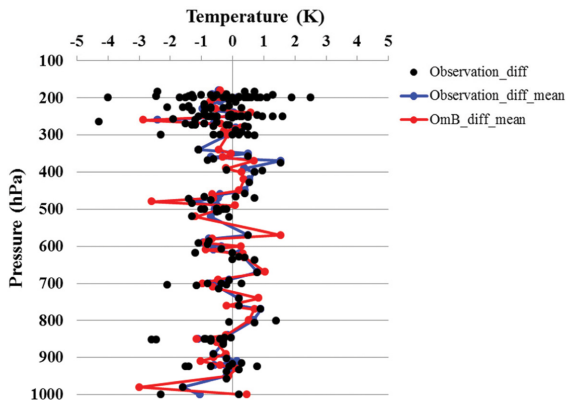


Fig. 2. Vertical profile of differences (black dots) between sonde and aircraft temperature (sonde minus aircraft), former altitude average (blue line with dots) and altitude average (red line with dots) of background innovation differences between sonde and aircraft temperature at 0000 UTC on June 22, 2017.

편향되어 있다고 볼 수 없었다. 따라서 존데와 직접적인 비교를 통한 항공기 온도 편향 측정은 어려울 것으로 판단되었다. 이는 존데 온도가 측정된 존데의 위치가 원인일 것으로 추정된다. 존데 자료는 하층에서부터 바람의 영향을 받아 위치 오차가 발생하게 되는데, 상층으로 갈수록 더 강해지는 풍속 때문에 그 위치오차는 더 크게 발생할 것이기 때문이다. 이를 확인하기 위해 존데와 항공기의 풍속을 비교해보았다 (Fig. 3). 존데와 항공기의 풍속과 각각을 10 hPa 간격으로 연직 평균한 값을 살펴보았을 때, 하층에서부터 풍속이 약 10 m s^{-1} 로 강하게 나타났으며, 상층으로 갈수록 더 강해지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 이미 하층에서부터 존데의 위치 오차가 크다는 것을 알 수 있었고, 항공기와 존데 온도의 시-공간 일치 비교는 어려울 것으로 판단되었다.

3. 평균 오차 분석

3.1 자료 및 방법

2장에서 존데와 항공기 온도의 직접적인 비교의 어려움으로 인해 Ballish and Kumar (2006)에서와 같이 존데와 항공기 온도 관측증분의 평균 오차 분석을 시도하였다. Ballish and Kumar (2006)가 언급한 2004년 7월 한 달 0000 UTC의 온도 편향 연직분포에서 AMDAR 온도는 500 hPa를 제외한 모든 고도에서 양의 편향을 보였고, 존데 온도는 대류권 중하층에서 양의 편향을, 대류권 상층과 최하층에서 음의 편향을 보였다. 이와 같은 방법으로 KPOP을 통해 전처리된 존

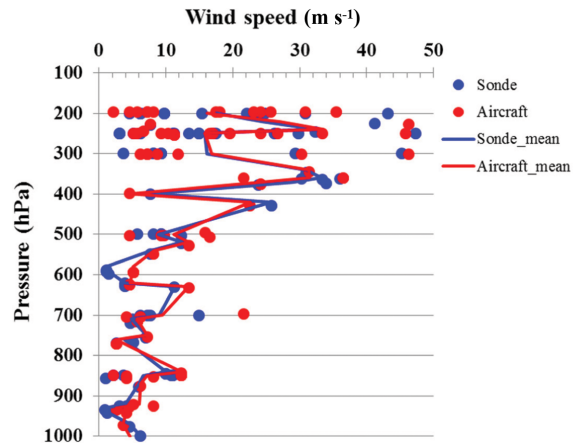


Fig. 3. Vertical profile of wind speeds of sonde (blue dots) and aircraft (red dots), former altitude average of sonde (blue line) and aircraft (red line) wind speeds at 0000 UTC on June 22, 2017.

데와 항공기의 온도는 어떠한 편향 분포를 보이는지 분석하였다.

본 연구에서는 2017년 6월 1일부터 30일까지의 0000, 1200 UTC에 대한 존데와 항공기 온도 관측증분의 한 달 평균 값을 이용하였다. 존데 자료는 KPOP을 통해 전처리된 관측 값 중 분석시각에 해당하는 자료를 사용하였고, 항공기 자료는 전처리된 값 중 분석시각과의 차이가 ± 30 분 이내에 속하는 자료를 사용하였다. 고도별 분석을 위해 200~300 hPa, 300~500 hPa, 500~850 hPa, 850 hPa~지표면(Surface; SFC) 구간으로 나누었고, 존데의 온도 자료가 관측되는 0000 UTC와 1200 UTC로 나누어 시간별 분석을 하였으며, 지역별 분석은 존데가 주로 분포하고 있는 육지를 중심으로 북아메리카(North America; NA: latitude 25°N ~ 55°N , longitude 130°W ~ 75°W), 유럽(Europe; EU: latitude 35°N ~ 65°N , longitude 10°W , 35°E), 동아시아(East Asia; EA: latitude 20°N ~ 50°N , longitude 100°E ~ 150°E), 호주(Australia; AU: latitude 45°S ~ 10°S , longitude 110°E ~ 180°)로 나누어 분석하였다(Fig. 4). 본 연구에서 사용된 존데와 항공기의 온도 관측 자료 수는 각 지역별, 고도별, 시간별로 Table 1에 나타내었다. 항공기의 지구 관측 자료 개수가 존데에 비해 더 적은 특징이 있는데, 이는 앞서 사용할 자료를 선택할 때 설정한 시간 범위 때문인 것으로 보인다. 북아메리카, 유럽, 동아시아의 관측 개수도 이와 같은 특징을 보였다. 그러나 호주의 존데 샘플 자료 수는 다른 지역에 비해 훨씬 적게 나타났고, 다른 지역들의 특징과 반대로 항공기 관측 자료 수가 존데보다 많은 것을 확인할 수 있었다. 1200 UTC의 분포는 나타내지 않았다.

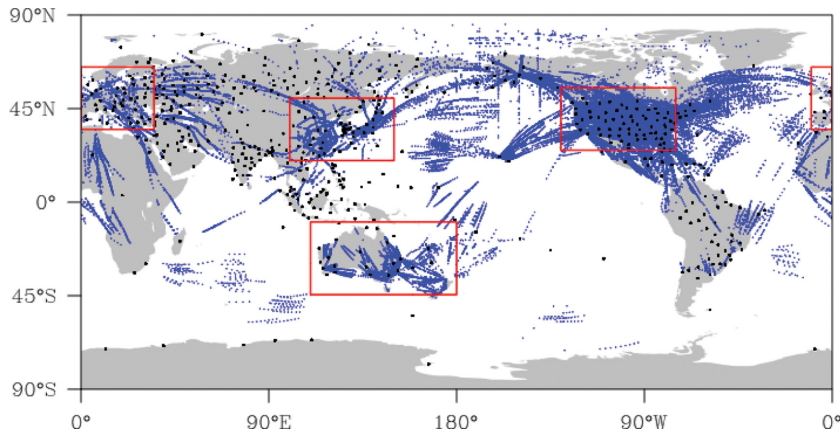


Fig. 4. Distribution of positions about sonde and aircraft observations for a one month at 0000 UTC in June 2017. Black and blue dots mean positions of sonde temperature observations at analysis time and aircraft temperature observations within ± 30 minutes from analysis time respectively. Red boxes mean coverage of analysis data.

Table 1. The number of aircraft and sonde temperature observations for one-month at 0000 and 1200 UTC in June 2017 with respect to Global (GL), North America (NA), Europe (EU), East Asia (EA) and Australia (AU).

Data	Pressure (hPa)	GL		NA		EU		EA		AU	
		0000	1200	0000	1200	0000	1200	0000	1200	0000	1200
Aircraft	200-300	57,640	50,179	26,955	19,679	1,004	7,788	2,678	2,222	3,356	1,726
	300-500	18,662	21,633	10,960	10,257	155	4,551	2,573	2,990	1,140	645
	500-850	10,812	14,796	5,090	5,051	152	3,572	2,182	2,469	593	582
	850-SFC	4,547	6,826	1,659	1,767	111	2,054	1,101	1,187	290	284
	Sum	91,661	93,434	44,664	36,754	1,422	17,965	8,534	8,868	5,379	3,237
Sonde	200-300	62,253	57,339	14,149	13,775	5,553	4,639	4,892	4,424	458	130
	300-500	97,306	89,521	23,486	22,578	7,541	6,476	7,748	6,991	788	333
	500-850	130,212	122,211	29,453	30,415	11,450	9,317	10,119	9,517	1,189	495
	850-SFC	61,482	56,131	8,951	11,122	5,836	4,038	5,615	5,083	628	210
	Sum	351,253	325,202	76,039	77,890	30,380	24,470	28,374	26,015	3,063	1,168
Total		422,914	418,636	120,703	114,644	31,802	42,435	36,908	34,883	8,442	4,405

3.2 분석 결과

Figure 5는 2017년 6월 한 달 동안 0000, 1200 UTC에 대한 존데와 항공기 온도 관측증분의 구간별 평균 값을 각각 (a) 전구, (b) 북아메리카, (c) 유럽, (d) 동아시아, (e) 호주에 대해 나타낸 것이다. Figure 5a의 전구분포를 보면, 모든 구간에서 항공기 온도 관측증분은 존데 대비 양의 값을 보였고, 300~500 hPa, 500~850 hPa의 항공기 관측증분을 제외하고 0000 UTC보다 1200 UTC의 존데와 항공기 관측증분이 조금 더 크게 나타났다. 비행고도에 해당하는 200~300 hPa에서 항공기는 약 0.25 K 정도의 양의 값을 띄웠고, 존데는 약 0.1 K 정도의 음의 값을 띄웠다. 500 hPa 이하에서는 존데의 음의 값이 항공기보다 더 크게 나타났다. 모든 구간에서 항공기와 존데 온도 관측증분의

방향성이 Ballish and Kumar (2006)가 언급했던 것과 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 지역별로 보았을 때 전반적으로 모든 지역의 항공기 온도에서 존데 대비 양의 분포를 보이며, 0000 UTC보다 1200 UTC의 관측증분이 대부분 더 크게 나타났다. 다른 지역에 비해 북아메리카에서 온도 관측증분이 가장 작게 나타났고, 대류권 상하층의 존데를 제외한 모든 층의 관측증분 양상이 전지구 양상과 가장 비슷하게 보였다(Fig. 5b). 유럽은 1200 UTC보다 0000 UTC의 관측증분이 양의 방향으로 더 크게 나타났고, 대류권 중층보다 상층과 하층에서 관측증분의 크기가 크게 나타났다(Fig. 5c). Cardinali et al. (2003)이 언급한 바와 같이 북미와 유럽의 항공기 온도 자료와 라디오존데 자료를 비교하였을 때 항공기 자료에 평균적으로 양

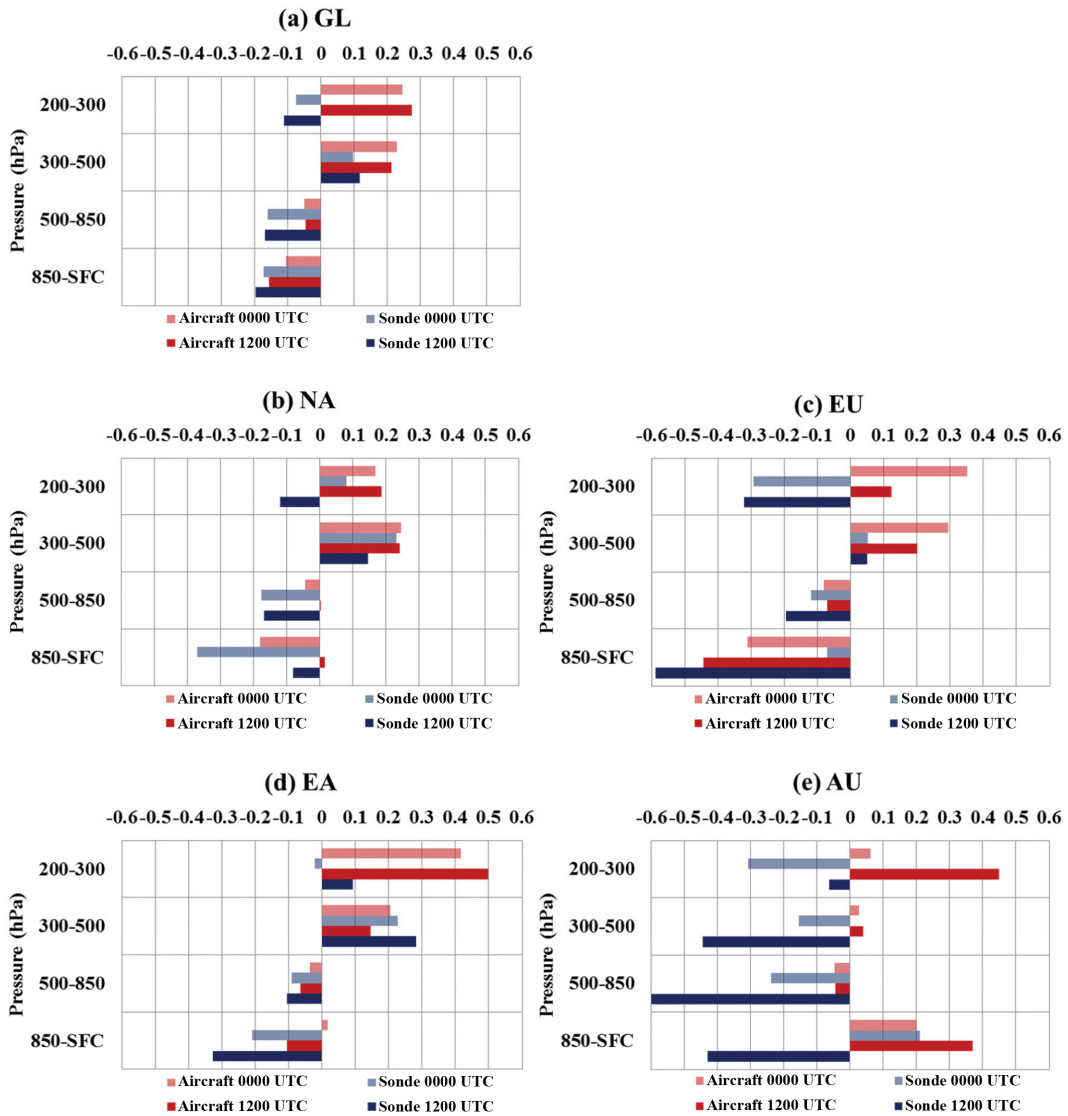


Fig. 5. Vertical profiles of background innovation average of sonde and aircraft temperature for a 1 month at 0000 and 1200 UTC in June 2017 with respect to Global (GL), North America (NA), Europe (EU), East Asia (EA) and Australia (AU) (K).

의 편향이 존재함을 확인하였다. 동아시아에서는 비행고도로 간주되는 200~300 hPa에서 다른 지역에 비해 항공기의 관측중분이 가장 크게, 존데는 가장 작게 나타났으며, 300~500 hPa에서 존데의 양의 관측중분은 항공기보다 크게 나타났다(Fig. 5d). 호주에서 존데와 항공기 관측중분의 차이가 다른 지역보다 더 크고 0000 UTC와 1200 UTC의 차이도 크게 나타났는데, 이는 3.1에서 언급했던 것과 같이 존데 자료의 샘플수가 다른 지역에 비해 적은 것이 원인일 것으로 추정된다(Fig. 5e).

Figure 6과 Fig. 7은 2017년 6월 한 달 동안 0000 UTC와 1200 UTC에 대해 고도별 존데와 항공기 온도 관측중분을 $5^\circ \times 5^\circ$ 간격으로 나누어 평균한 값의 차이를 공간분포로 나타낸 것이다. 붉은 색이 진할수록 항공기 온도의 양의 편향이 크다는 것을 의미하고, 그림 아래의 각 값들은 전구 항공기 온도 편향의 최솟값, 최댓값, 평균, 표준편차를 나타낸다. 해당 분석은 존데가 참값이고, $5^\circ \times 5^\circ$ 간격으로 나눈 공간 내에서 존데와 항공기의 온도 배경값이 비슷한 성능을 가진다고 가정했을 때 항공기 온도 편향은 존데와 항공기

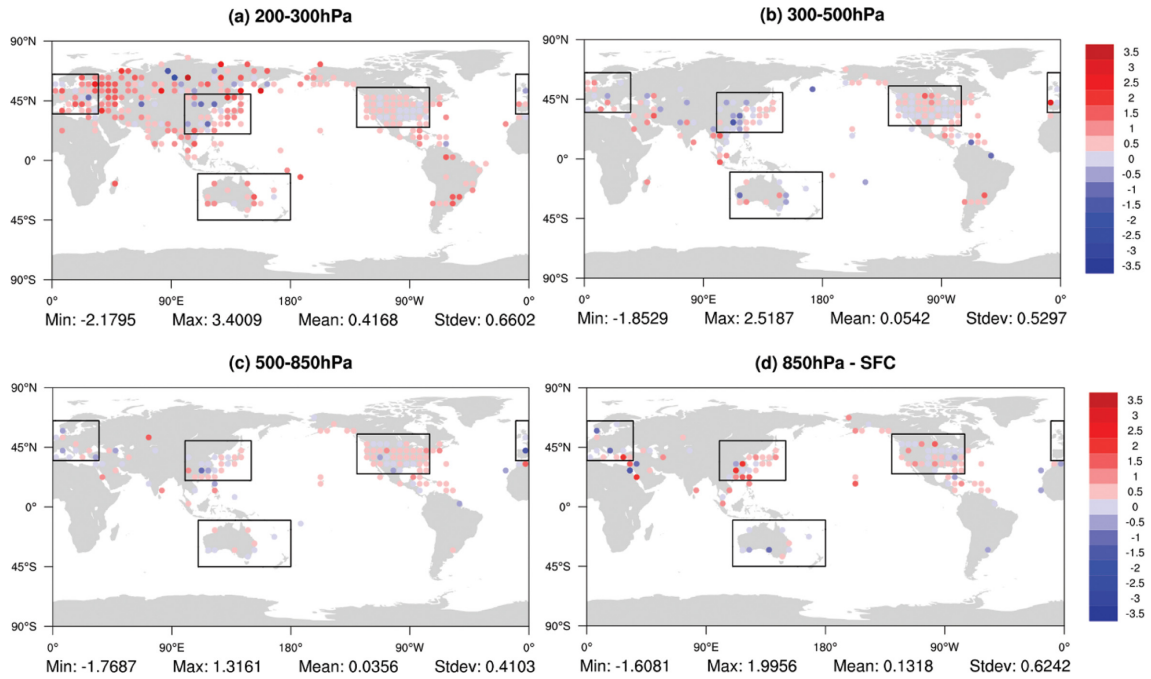


Fig. 6. Horizontal distributions of differences about background innovation average between aircraft and sonde temperature that means the aircraft temperature bias for a 1 month at 0000 UTC in June 2017 with respect to 200~300 hPa, 300~500 hPa, 500~850 hPa and 850 hPa~Surface (K). Each value is the minimum, maximum, mean and standard deviation of global aircraft temperature bias.

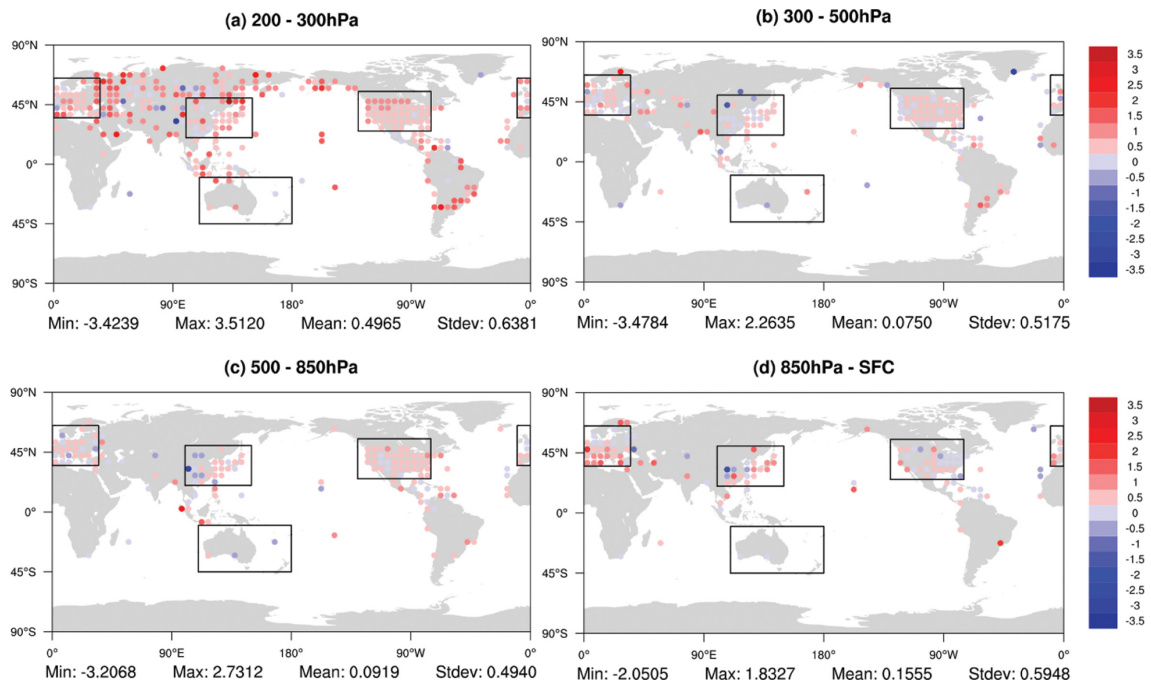


Fig. 7. Same as Fig. 6 but for 1200 UTC (K).

Table 2. Vertical average of background innovation (O-B) and bias-corrected background innovation (C-B) about aircraft temperature for a 1 month at 0000 and 1200 UTC in June 2017 with respect to Global (GL), North America (NA), Europe (EU), East Asia (EA) and Australia (AU) (K).

Pressure (hPa)	UTC	Global		North America		Europe		East Asia		Australia	
		O-B	C-B	O-B	C-B	O-B	C-B	O-B	C-B	O-B	C-B
200-300	0000	0.2453	0.0304	0.1669	0.0099	0.3516	0.1598	0.4169	0.1578	0.0626	-0.2116
	1200	0.273	0.0498	0.1863	0.0265	0.1236	-0.1305	0.4983	0.206	0.4491	0.15
300-500	0000	0.2292	0.1586	0.2443	0.1872	0.2942	0.2004	0.204	0.1098	0.0269	-0.0629
	1200	0.2122	0.1362	0.2404	0.1782	0.201	0.1139	0.1461	0.0529	0.0386	-0.0637
500-850	0000	-0.0503	-0.0967	-0.0441	-0.0789	-0.0803	-0.1296	-0.0357	-0.0941	-0.0459	-0.0839
	1200	-0.0468	-0.0975	0.0034	-0.0289	-0.0703	-0.1342	-0.0646	-0.1286	-0.0448	-0.1015
850-SFC	0000	-0.1053	-0.1301	-0.1815	-0.2012	-0.3119	-0.3472	0.0163	-0.0114	0.1996	0.186
	1200	-0.1566	-0.1814	0.0152	0.0022	-0.4436	-0.4734	-0.1058	-0.1371	0.37	0.3418

관측증분 차이로 추정 가능하다고 판단하였다.

전구 평균값을 보았을 때 모든 고도에서 항공기 온도에 양의 편향이 있음을 확인할 수 있었다. 200~300 hPa의 항공기 온도 편향은 대부분의 지역에서 양의 편향을 나타냈으며, 전구 평균은 0000 UTC보다 1200 UTC에서 약 0.08 K 정도 크게 나타났다(Figs. 6a, 7a). 일부 지역의 항공기 온도는 음의 편향을 보였는데, 이는 자료의 샘플 수가 적거나 지역적 원인이 있을 것으로 추정된다. 또한, 200~300 hPa 분포를 지역별로 보았을 때 상대적으로 0000 UTC에 유럽에서 양의 편향이 다른 지역보다 크게 나타났고, 1200 UTC에는 북아메리카, 동아시아, 호주에서 양의 편향이 더 강하게 나타났다. 이는 지역별 시간에 따른 태양 복사 에너지의 영향이 있을 것으로 보인다. 이 외 나머지 고도에서의 평균값은 대체적으로 0에 가깝게 분포하였고, 0000 UTC보다 1200 UTC에서 양의 편향이 더 강하게 나타났다.

4. 편향 보정된 항공기 온도의 평균 오차 분석

4.1 자료 및 방법

3장의 분석 자료와 결과를 토대로 현재 KIM과 가장 가까운 자료동화기법을 사용하고 있는 캐나다 기상청의 정적 편향 보정 방법(1장에서 설명)을 변형하여 KPOP 과정에서 항공기 온도 자료의 편향 보정을 시도하였다. 3장에서 분석한 Fig. 5의 연직 구간에 따라 200~300 hPa, 300~500 hPa, 500~850 hPa, 850 hPa~지표면 구간에 대해 각각 0.34, 0.12, 0.12, 0.05 K을 기온 관측 값에서 감소시켰다. 해당 값들은 0000 UTC와 1200 UTC에 대한 고도별 항공기 온도 편향을 평균한 것이다. 이렇게 편향 보정된 항공기 온도 자료를 이용하여 3.1과 같은 기간(2017년 6월 한 달의 0000, 1200 UTC)에 대해 보정된 관측(Bias-corrected

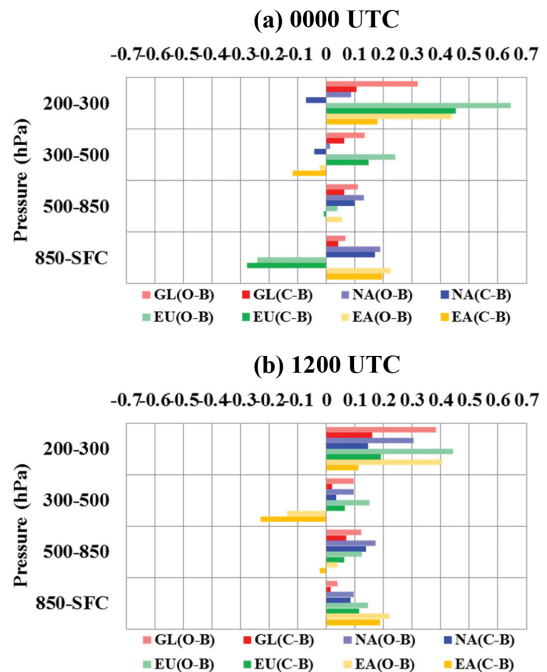


Fig. 8. Vertical profiles of average for aircraft temperature bias before and after bias correction at 0000 and 1200 UTC in June 2017 (K).

observation; C)에서 모델 배경장(Background; B)을 뺀 편향 보정된 관측증분(C-B, i.e., Bias-corrected background innovation)의 평균 오차를 분석하였다.

4.2 분석 결과

Table 2는 2017년 6월 한 달 동안 0000, 1200 UTC에 대한 항공기 온도의 관측증분과 편향 보정된 관측증분을 평균하여 고도, 시간, 지역별로 비교한 것이다.

항공기 관측 자료가 많이 분포하고 양의 편향이 뚜렷하게 나타났던 200~500 hPa 사이의 관측증분은 대부분 지역에서 편향 보정 후에 0 K에 상당히 가까워진 것을 확인할 수 있었다. 그 외의 고도에서 편향 보정의 방향성은 일치하지만 과하게 보정되어 관측증분이 오히려 음으로 나타나거나 보정 전에 이미 음의 값을 띤 관측증분은 더 음으로 나타났다. 호주의 관측증분은 850 hPa-지표면 구간과 200~300 hPa의 1200 UTC를 제외하고 음의 값을 보였는데, 호주의 존데와 항공기 온도의 샘플 자료 수가 적은 탓에 호주 지역의 항공기 관측증분 특성을 대표한다고 보기 어려운 것으로 판단된다.

Figure 8은 2017년 6월 한 달 동안 0000, 1200 UTC에 대해 편향 보정 전과 후의 항공기 온도 편향을 나타낸 것이다. Table 2에서 보인 바와 같이 호주 관측증분은 대표성이 낮아 Fig. 8에 포함하지 않았다. 전체적으로 편향 보정 후에 항공기 온도의 양의 편향이 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 200~300 hPa에서 편향 보정 정도가 가장 컸는데, 전지구 양의 편향은 약 0.25 K 정도 감소하였다. 일부 지역에서 편향이 과하게 보정되어 양의 편향이 음의 편향으로 나타났고, 동아시아와 유럽에서 보였던 음의 편향은 더 강하게 나타났다.

5. 요약 및 토의

본 연구에서는 KIAPS 자료동화 예측실험(cycle-run)에서 항공기 관측 온도의 편향보정 방안 개발을 위한 선행연구로 고도, 라디오존데 관측자료와의 비교를 통해 지역, 연직구간 및 시간에 따른 항공기 관측 온도의 편향 특성을 분석하였다. 항공기 관측자료의 편향보정을 수행하는 현업기관들과 대부분의 선행 연구들은 항공기별 관측 특성을 고려하여 항공기별로 구분된 보다 세밀한 분석과 편향보정이 이루어져야 한다고 주장하고 있다. 그러나 기상청의 현업용 관측자료를 이용하는 KPOP에서는 항공기 식별번호와 추적된 항로가 1대 1로 정확히 일치하지 않는 문제가 종종 발견됨에 따라, 선행연구들이 제시하는 바와 같이 항공기별로 구분된 편향특성 분석이 제한적이다. 이를 보완하기 위하여 북미, 유럽, 아시아, 호주 등 지역을 구분하고, 시간과 고도에 따라 라디오존데 관측자료와 비교를 통한 분석을 단계적으로 수행하였다.

1단계로는 2017년 6월 22일 0000 UTC 사례에서 라디오존데 관측지점을 중심으로 시/공간적 범위(± 0.5 deg./30분) 내의 항공기 관측자료를 직접 비교하는 분석방법을 시도하였으나, 연직 및 수평방향으로 충분한 관측자료 샘플을 확보하기 어려웠다. 또한 분석 고도에 따라 선행 연구들에서 제시된 항공기 관측의

통계적 편향 이상으로 과도하게 큰 분석 결과가 도출되었는데, 이는 본 연구에 사용된 라디오존데 관측자료의 대부분이 GTS를 통해 전문형태로 입수됨에 따라 실제 관측이 제공하는 모든 관측고도에서의 위치(위·경도)와 시간 정보가 누락되었기 때문으로 판단하였다. 각 관측고도에서의 위치와 시간정보가 없는 현재의 라디오존데 관측자료는 연직방향으로 수직 상승하는 것으로 가정하고 있지만, 실제로는 관측지점으로부터 200 km 이상 멀리까지 표류하는 것으로 원시 관측자료를 통해 알려졌다. 즉, 상대적으로 정확한 관측위치와 고도를 제공하는 항공기 관측자료와 수평적으로 어디까지 표류했는지 알 수 없는 라디오존데 관측자료를 직접 비교한 결과는 신뢰하기 어렵다는 결론을 도출하였다.

앞서 수행된 1단계 직접비교 방안의 한계를 극복하기 위하여 2단계에서는 2017년 6월 1개월 동안 전지구 및 각 분할된 영역과 연직 구간에 대해 0000, 1200 UTC로 나누어 산출한 항공기와 라디오존데 각 관측의 평균 관측증분을 비교함으로써 항공기 관측 온도의 편향 특성을 분석하였다. 고도 구간에 따라 항공기의 항속구간에 해당하는 약 200 hPa 구간에서 항공기 관측의 편향이 대체로 크게 나타났으며, 고도에 따라 차이는 있지만 대부분 모든 고도에서 항공기 관측 기온의 전구 평균은 라디오존데 대비 양의 편향을 보이는 것으로 나타났다. 고도구간별로 항공기 관측 온도의 편향 양상이 다르게 나타나는 것은 항공기가 상승 또는 하강하는 과정에서 서로 다른 유형의 오차요인이 영향을 미치기 때문인 것으로 추정되고 있다 (Schwartz and Benjamin, 1995). 이를 근거로 많은 선행 연구들은 항공기의 운항형태에 따라 이/착륙 및 항속구간 각각에 대한 분석과 편향보정을 구분해야 한다고 말한다. 지역별 평균은 지역마다 다른 패턴의 편향을 보였는데, 대부분 라디오존데 관측에 비해 항공기 관측 온도에서 양의 편향이 확인되었으나, 중국과 호주 등의 일부 지역에서는 반대로 음의 편향이 확인되기도 하였다. 항공기와 라디오존데 관측이 모두 충분히 많은 북미지역에서 편향이 가장 작게 나타났으며, 다른 지역에 비해 라디오존데 관측 수가 상대적으로 크게 적었던 호주에서는 모든 고도에서 라디오존데와 항공기 관측 온도의 관측증분 차이가 가장 크게 나타났다. 시간대에 따라 구분한 분석결과에서 항공기 관측 온도의 양의 편향은 주로 0000 UTC보다 1200 UTC에 상대적으로 더 심한 것으로 나타났는데, 지역에 따라 낮 시간에 해당하는 경우 태양 복사가 항공기 관측 온도의 양의 편향에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

관측증분의 평균 오차 분석을 통해 항공기 관측 온도에 양의 편향이 존재함을 확인하였고, 이를 바탕으로

로 캐나다 기상청의 정적 편향 보정 방안을 KIAPS 자료동화 시스템에 적합하도록 개선하였다. 본 연구를 통해 고도구간에 따라 산출한 전지구 단일 편향보정계수를 자료동화 예측실험에 적용한 민감도 실험을 수행하였다. 전반적으로 항공기 관측에 대한 편향보정을 수행한 경우에 관측증분이 0에 더 가까이 근접하였고, 양의 편향은 감소하였지만, 일부 지역에서는 반대로 음의 편향이 증가되기도 하였다. 특히 음의 편향이 증가한 이유는 지역에 상관없이 항공기 관측 온도로부터 편향보정 계수만큼 줄이는 방향으로 편향보정을 적용했기 때문으로 사료된다.

앞서 서론에서 언급한 항공기 온도 관측 자료의 편향에 대한 연구는 지역 범위가 북미나 유럽으로 제한된 경우가 대부분이었고, 현재 정적 편향 보정 방법을 적용하는 기관은 전구 자료의 통계에 의해 계산된 하나의 계수를 이용하고 있다. 그러나 본 연구에서는 항공기 관측 온도의 편향이 지역에 따라 다르게 나타나는 것을 확인하였고, 지역에 상관없이 전지구 영역에 대한 고도구간별 단일 편향보정계수를 이용한 자료동화 예측실험에서 오히려 음의 편향이 증가하는 부정적 효과가 발생할 수 있음을 확인하였다. 따라서 지역에 따라 구분된 편향보정이 필요함을 알 수 있다. 다만, 라디오존데 관측이 존재하는 육상 및 본 연구에서 살펴본 각 지역에 대해서는 항공기 관측 온도의 편향 특성을 분석하고 이를 기반으로 편향보정을 적용할 수 있겠지만, 라디오존데 관측과 항공기 관측이 지역적으로 겹치지 않는 해상 등의 지역에서는 편향특성을 분석하고 편향보정 방안을 적용하기 어려운 한계를 가지고 있다. 향후 연구에서는 지역과 시간에 따라 다르게 나타나는 항공기 관측 온도의 편향특성을 모두 고려하기 위하여 각 관측지점에서의 시간과 위·경도를 기반으로 산출한 태양복사와 온도 편향의 관계를 분석하고 이를 편향보정에 활용하는 방안을 개발할 계획이다. 또한 선행 연구들과 마찬가지로 항공기 관측자료의 배제실험을 통해 KIM 배경장에 대한 관측증분을 기반으로 한 전지구 편향보정 계수의 산출 실험도 필요하다. 현재 사용중인 항공기 관측자료로부터 각각의 항공기 비행 경로를 완벽히 구분하기 위한 고유의 항공기 식별방안에 대한 연구도 병행되어야 할 것이며, 그럼으로써 선행 연구들이 제시한 항공기별로 구분된 편향특성 분석 및 이를 바탕으로 한 편향보정 방안의 개발 연구도 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청의 지원을 받는 한국형수치예보모델개발사업단의 연구과제를 통해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ballish, B. and V. K. Kumar, 2006: Comparison of aircraft and radiosonde temperature biases at NCEP. Preprints, *10th Symp. On Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS)*, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., 3.5 [Available online at <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/103076.pdf>].
- Benjamin, S. G., B. E. Schwartz, and R. E. Cole, 1999: Accuracy of ACARS wind and temperature observations determined by collocation. *Wea. Forecasting*, **14**, 1032-1038.
- Buehner, M., and Coauthors, 2015: Implementation of deterministic weather forecasting systems based on Ensemble-Variational data assimilation at Environment Canada. Part I: The global system. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 2532-2559, doi:10.1175/MWR-D-14-00354.1.
- Cardinali, C., L. Isaksen, and E. Andersson, 2003: Use and impact of automated aircraft data in a global 4DVAR data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1865-1877.
- Collins, W. G., 1999: Determination of new adjustment tables in order to bring radiosonde temperature and height measurements from different sonde types into relative agreement. EMC/NCEP/NOAA [Available online at http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/papers/collins/new_tables/new_tables.html].
- Ha, J.-H., I.-H. Kwon, J.-H. Kwon, J.-H. Kang, and H.-W. Chun, 2015: Use and impact of sonde, aircraft and satellite observations in the KIM-3DVAR system. *Proceedings, The spring meeting of the Korean Meteorological Society*, Seoul, Korea, KMS, 151-152 (in Korean).
- Hong, S.-Y., and Coauthors, 2018: The Korean Integrated Model (KIM) system for global weather forecasting. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **54**, 267-292, doi:10.1007/s13143-018-0028-9.
- Kang, J.-H., and Coauthors, 2018: Development of an observation processing package for data assimilation in KIAPS. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **54**, 303-318, doi:10.1007/s13143-018-0030-2.
- Painting, D. J., 2003: AMDAR reference manual. WMO, 84 pp [Available online at https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_958_en.pdf].
- Park, O.-R., and Y.-S. Kim, 2002: A study on the verification and sensitivity test for the ACARS data. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **38**, 333-342.
- Petersen, R. A., 2016: On the impact and benefits of

- AMDAR observations in operational forecasting—
Part I: A review of the impact of automated aircraft
wind and temperature reports. *Bull. Amer. Meteor.
Soc.*, **97**, 585-602, doi:10.1175/BAMS-D-14-00055.1.
- Sako, H., 2010: Assimilation of Aircraft Temperature Data
in the JMA Global 4D-Var Data Assimilation System.
In J. Côté, Ed., *Research Activities in Atmospheric
and Oceanic Modelling*. WMO, S1 33-34 [Available
online at [http://bluebook.meteoinfo.ru/uploads/2010/
individual-articles/01_Sako_Hiroshi_aircraft_temp.pdf](http://bluebook.meteoinfo.ru/uploads/2010/individual-articles/01_Sako_Hiroshi_aircraft_temp.pdf)].
- Schwartz, B., and S. G. Benjamin, 1995: A comparison of
temperature and wind measurements from ACARS-
equipped aircraft and rawinsondes. *Wea. Forecast-
ing*, **10**, 528-544.
- WMO, 2017: *Guide to Aircraft-based Observations*. World
Meteorological Organization, **1200**, 132 pp.