

2018년 8월 1일 홍천에서의 기록적인 고온 사례(41.0°C)에 영향을 준 편 바람

김석환¹⁾ · 이재규^{1)*} · 김유진^{1),2)}

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾강릉원주대학교 자연과학연구소
(접수일: 2021년 3월 5일, 수정일: 2021년 4월 14일, 게재확정일: 2021년 5월 6일)

Effect of Foehn Wind on Record-Breaking High Temperature Event (41.0°C) at Hongcheon on 1 August 2018

Seok-Hwan Kim¹⁾, Jae Gyoo Lee^{1)*}, and Yu-Jin Kim^{1),2)}

¹⁾Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

²⁾Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Natural Science Research Institute,
Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 5 March 2021; revised 14 April 2021; accepted 6 May 2021)

Abstract A record-breaking high surface air temperature of 41.0°C was observed on 1 August 2018 at Hongcheon, South Korea. In this study, to quantitatively determine the formation mechanism of this extremely high surface air temperature, particularly considering the contributions of the foehn and the foehnlike wind, observational data from Korea Meteorological Administration (KMA) and the Weather Research and Forecasting (WRF) model were utilized. In the backward trajectory analysis, trajectories of 100 air parcels were released from the surface over Hongcheon at 1600 LST on 1 August 2018. Among them, the 47 trajectories (38 trajectories) are tracked back above (below) heights of 1.4 km above mean sea level at 0900 LST 31 July 2018 and are defined as upper (lower) routes. Lagrangian energy budget analysis shows that for the upper routes, adiabatic heating ($11.886 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$) accounts for about 77% of the increase in the thermal energy transfer to the air parcels, while the rest (23%) is diabatic heating ($3.650 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$). On the other hand, for the lower routes, adiabatic heating ($6.111 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$) accounts for about 49% of the increase, the rest (51%) being diabatic heating ($6.295 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$). Even though the contribution of the diabatic heating to the increase in the air temperature rather varies according to the routes, the contribution of the diabatic heating should be considered. The diabatic heating is caused by direct heating associated with surface sensible heat flux and heating associated with the turbulent mixing. This mechanism is the Type 4 foehn described in Takane and Kusaka (2011). It is concluded that Type 4 foehn wind occurs and plays an important role in the extreme event on 1 August 2018.

Key words: Extreme high surface air temperature, foehn, backward trajectory analysis, Lagrangian energy budget analysis, diabatic heating

*Corresponding Author: Jae Gyoo Lee, Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 25457, Korea.
Phone: +82-33-640-2322, Fax: +82-33-640-2320
E-mail: ljgyoo@gwnu.ac.kr

1. 서론

2018년 8월 1일 홍천에서 일 최고기온 41.0°C가 기록되어, 대구에서 기록했던 전국 역대 1위인 40.0°C (1942년 8월 1일)를 경신하여 우리나라에서 가장 높은 기온 값이 되었으며, 또한 이 날에 영서지역인 서울(39.6°C), 춘천(39.5°C), 그리고 수원(39.3°C)에서도 일 최고기온 극값을 각각 경신하였다(KMA, 2018). 반면에 영동지역인 속초, 북강릉, 그리고 동해에서는 일 최고기온이 각각 31.7°C, 31.5°C 그리고 29.9°C로, 영동지역은 영서지역에 비해 약 9~10°C 정도 크게 낮아, 홍천의 기록적인 고온 현상은 편(Foehn)과 밀접한 관련성이 있음을 Lee (1994)의 편 정의에서 어느 정도 알 수 있다.

우리나라의 고온 현상은 주로 대규모 순환의 영향으로 나타나지만 대규모 순환의 영향과 함께 지역적인 편 현상이 더해져 고온 현상이 보다 강화되기도 한다. 예를 들면, 태백산맥의 동쪽에 위치한 영동지역에서 동풍 계열의 바람이 불어 기류가 산맥을 넘어가면서 편 현상이 나타나면 풍하측인 태백산맥 서쪽에 위치한 영서지역에서는 몹시 고온 건조한 대기가 조성된다(Lee, 1994; Choi et al., 1997; Kim and Kim, 2013; Park, 2020). 그리고 풍향이 바뀌어 우리나라 남서쪽에서 영서지역으로 서풍 계열의 바람이 지속적으로 부는 경우, 공기덩이가 영서지역을 거쳐 태백산맥

풍상측까지 이르는 동안에 지표면 가열로 비단열적으로 데워지며, 이 데워진 공기가 태백산맥을 넘어 풍하측 영동지역으로 급하강하면서 건조단열적으로 승온된 편 바람이 불어 영동지역은 고온 건조한 상태가 된다. 따라서 정상적인 편과 혼동을 피하기 위해 “유사 편(quasi-foehn)”이라고 정의할 것을 제안하기도 하였다(Kim and Hong, 1996). Back et al. (2018)은 자기조직화지도(self-organizing map)를 이용하여 서울에서 발생한 폭염의 발생 기작과 일변동성 및 경향 특성에 따라 1) 남서 기류 유입에 의한 유형, 2) 한반도 동쪽에는 고기압성 순환, 서쪽에는 저기압성 순환이 존재하여 남풍 기류가 유입되는 유형, 3) 준 정체성 고기압의 영향을 받은 유형, 4) 동풍에 의한 편과 관련된 폭염 유형으로 분류하였다. 이와 같이 편에 의한 고온 현상과 관련된 국내 연구들은 주로 종관 및 기후학적인 측면에서 정성적(qualitative)으로 분석된 내용이 주를 이루었다(e.g. Kim et al., 1998; Choi and Kwon, 2005; Byun et al., 2006; Kim et al., 2008; Park and Suh, 2011; Lee et al., 2020).

한편, 국외 연구의 경우, Takahashi (1996)는 산을 넘어가는 기류와 관련하여 높은 기온 현상을 일으키는 세 가지 편 유형(Fig. 1 참조)을 다음과 같이 정리하였다: Type 1은 열역학적 편[thermodynamic (wet) foehn]이라 불리는 고전적인 편으로, 공기덩이가 산에 의해 강제 상승함에 따라 풍상측에서는 강수 현상이

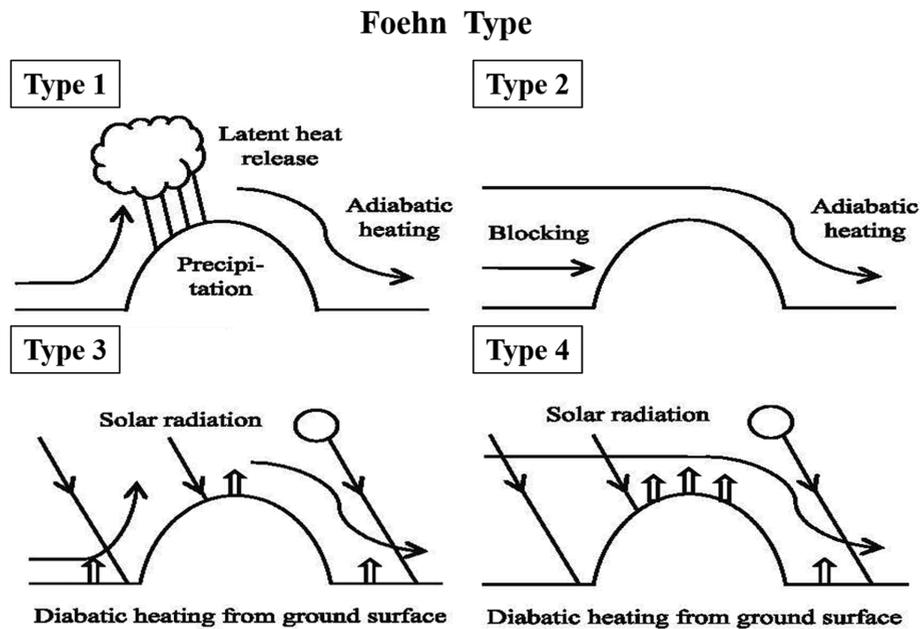


Fig. 1. Conceptual representation of foehn types of high temperature phenomena associated with a flow over a mountain [these figures are modifications of Takahashi (1996) and Takane and Kusaka (2011)].

나타나고, 이에 따른 습윤열 방출로 풍하측이 고온 건조해지는 바람(Hann 1866, 1867; Scorer, 1978; Smith, 1990; Barry, 1992; Whiteman, 2000; Richner and Hächler, 2013), Type 2는 역학적 편[dynamic (dry) foehn]으로, “isentropic drawdown (등온위 끌어내림)”과 관련 있는 것으로, 풍상측에서 저지된(blocked) 공기덩이가 강제 상승을 하지 못하고, 대신에 이 공기덩이보다 더 높은 고도에 위치한 보다 건조하고 높은 온위의 공기덩이가 풍하측으로 불어 내려가면서 단열 압축에 의한 가열로 고온 건조해지는 바람(Hann, 1901; Ficker, 1910; Scorer and Klieforth, 1959; Beran, 1967; Arakawa, 1969; Brinkmann, 1973, 1974; Ikawa and Nagasawa, 1989; Seibert, 1990; Gaffin, 2002; Barry, 2008; Sharples et al., 2010; Richner and Hächler, 2013), 그리고 Type 3은 산을 넘어가는 기류가 태양 일사에 의하여 가열된 지면으로부터의 비단열 가열로 더워지는 바람(Kondo and Kuwagata, 1983, 1984)이다. Takane and Kusaka (2011)는 2007년 8월 16일에 도쿄지역에서 나타난 기록적인 고온 현상이 발생하는 메커니즘과 관련하여, Takahashi (1996)가 분류한 편 유형 중에서 어떤 유형의 편 바람이 중요한 역할을 하였는지 알아보기 위해 후방 유적 분석(backward trajectory analysis) 및 라그랑주 에너지 수지 분석(Lagrangian energy budget analysis)을 하였으며, 특히 Type 3 유형인 비단열 가열로 더워지는 바람을 고전적인 편과 구분하여 “foehnlike wind (유사 편바람)”이라고 명하였다. 분석 결과, 풍상측에서 저층에 위치한 공기덩이가 저지(Blocking)에 의해 강제 상승을 하지 못한 상태에서, 보다 높은 고도에 위치한 공기덩이(높은 온위를 가짐)가 풍하측으로 불어 내려오면서 단열 압축에 의한 가열로 고온 건조해지고(Type 2), 그리고 풍상측의 공기덩이가 산을 넘어오면서 태양 일사에 의한 지면 느낌열 플럭스(flux)에 의해 가열되어 풍하측에서 고온 건조해져(Type 3: foehnlike wind), 도쿄지역에서 극 고온 현상이 나타났다고 하였다. 따라서 이와 같이 Type 2와 Type 3가 결합되어 나타나는 편 유형을 Type 4(Fig. 1 참조)라고 새롭게 정의하였다. Takane et al. (2015)은 도쿄지역에서 2011년 6월 24일에 발생한 극 고온 현상에 대해 여러가지 편 유형이 미치는 영향을 정량적으로 계산하여 고온 현상과 편 유형 사이의 관계를 알아보고자 하였고, Elvidge and Renfrew (2016)는 남극반도를 가로질러 Larsen C 빙붕(Ice Shelf)으로 부는 서풍류와 관련된 세가지 편 사례들을 대상으로 라그랑주 열수지 모델을 이용하여 편 바람이 건조하고 따뜻해지는 이유에 대해 정량적으로 규명하고자 하였다. Nishi and Kusaka (2019)는 후방 유적과 라그랑주 에너지 수지를 계산하여 2018년 7월 23일 쿠마가야지역에서 일 최고기온 극값을 경신한

고온(41.1°C)사례와 관련하여 편역의 역할을 정량적으로 조사하였다. Elvidge and Renfrew (2016)는 위에서 기술한 여러 유형의 편들 중에서 특정한 유형의 편역의 중요도는 지형 강제력을 받는 유체 역학(Orographically forced flow dynamics)과 기상 상태 그리고 지표면 조건 등에 따라, 각 사례별로 변한다고 하였다.

한편, 앞에서 언급한 것처럼 편역에 의한 고온 현상과 관련된 국내 연구의 경우, 대부분 기후학적 또는 종관적인 분석으로, 정량적(quantitative)이 아닌 정성적인 분석이 주를 이루고 있다. 따라서 이 연구에서는 2018년 8월 1일 홍천지역의 기록적인 고온 현상과 관련하여 어떤 유형의 편역이 중요한 역할을 하였는지 밝히고자 정량적인 분석을 하고자 한다. 이를 위해 WRF (Weather Research and Forecasting) 고분해능 수치모의를 구동하여 얻은 자료를 이용하여 후방 유적 분석과 라그랑주 에너지 수지 분석을 하여, 홍천으로 유입된 공기덩이의 지위 에너지와 느낌열 에너지 그리고 비단열 에너지가 혼합층(mixing layer) 내에서 어떻게 정량적으로 변하는지 분석하고자 한다. 이어서 2장에서는 일기도 및 관측자료 분석 결과를, 3장에서는 WRF 수치모의에 관한 내용과 후방 유적 분석 그리고 라그랑주 에너지 수지 분석 결과를 기술하였다. 끝으로 4장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 관측 자료 분석

분석에 사용된 자료는 기상청에서 제공한 지상 및 상층일기도, AWS (Automatic Weather Station) 자료, ASOS (Automated Synoptic Observing System) 자료, COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite) 합성영상 그리고 북극륙 상층기상자료이다.

2.1 종관 일기도 분석

Figure 2는 홍천지역에서 기록적인 일 최고기온이 발생하기 한 시간 전인 2018년 8월 1일 1500 LST (Local Standard Time)의 지상일기도와 850 hPa, 그리고 500 hPa 상층일기도이다. 먼저, 지상일기도(Fig. 2a)를 보면, 제주도 남쪽 먼 바다에 열대성 저기압이 서남서쪽으로 느리게 이동하고 있으며 여기서 뻗어 나온 약한 기압골이 서해 북부 해상에 위치하고 있으며, 중국 동북지역에 고기압 중심이 위치하고 있다. 그런데 1일 0900 LST(그림 생략)에 동해상에 위치하였던 북태평양 고기압은 1500 LST에는 기압능으로 약화된 채 동해상에 머물고 있다. 850 hPa 일기도(Fig. 2b)에서는 아열대 고기압 세력에 대응되는 닫힌 1470 gpm 등고도선이 중국 내륙을 포함하여 우리나라 중부이북 지역까지 감싸고 있어 중부지역은 아열대 고기압의

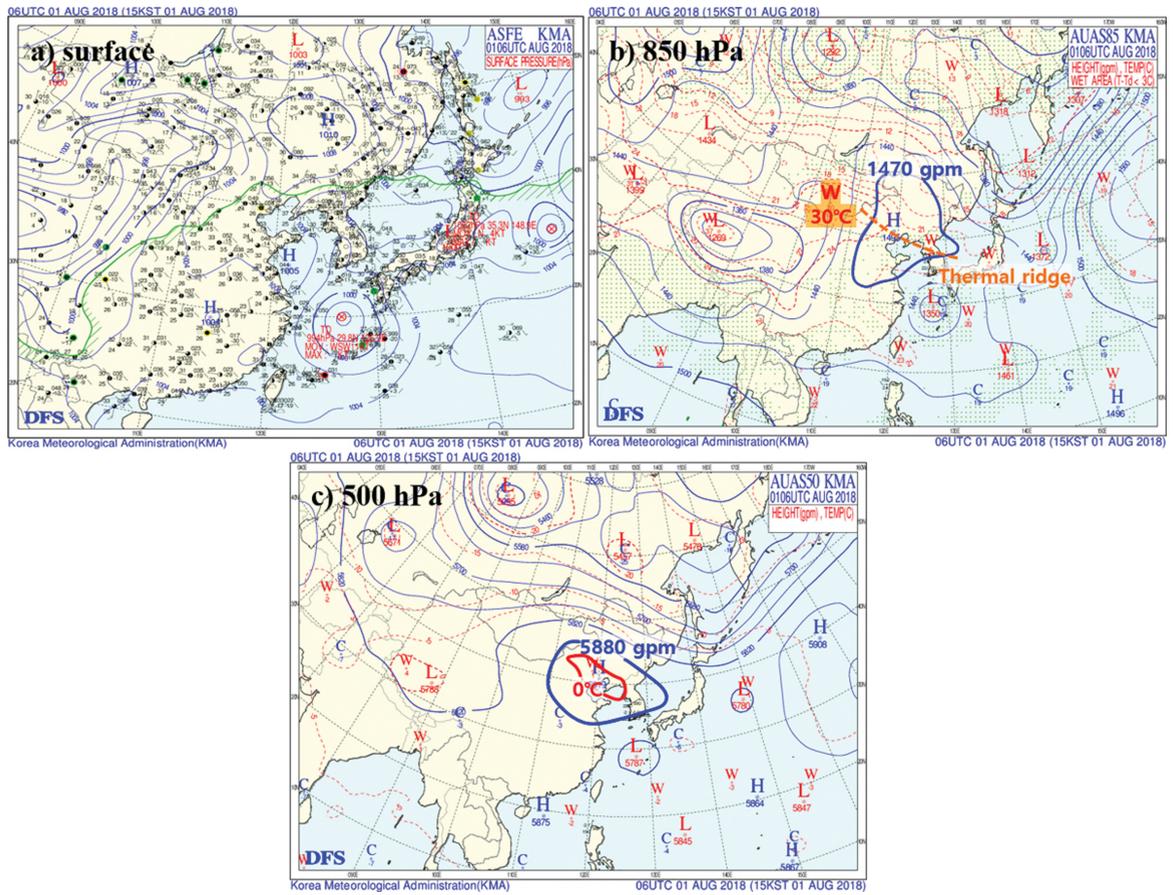


Fig. 2. (a) Surface synoptic chart, (b) 850 hPa synoptic chart (bold blue line indicates 1470 gpm isohypse), and (c) 500 hPa synoptic chart (bold blue line indicates 5880 gpm isohypse) at 1500 LST 1 August 2018, respectively.

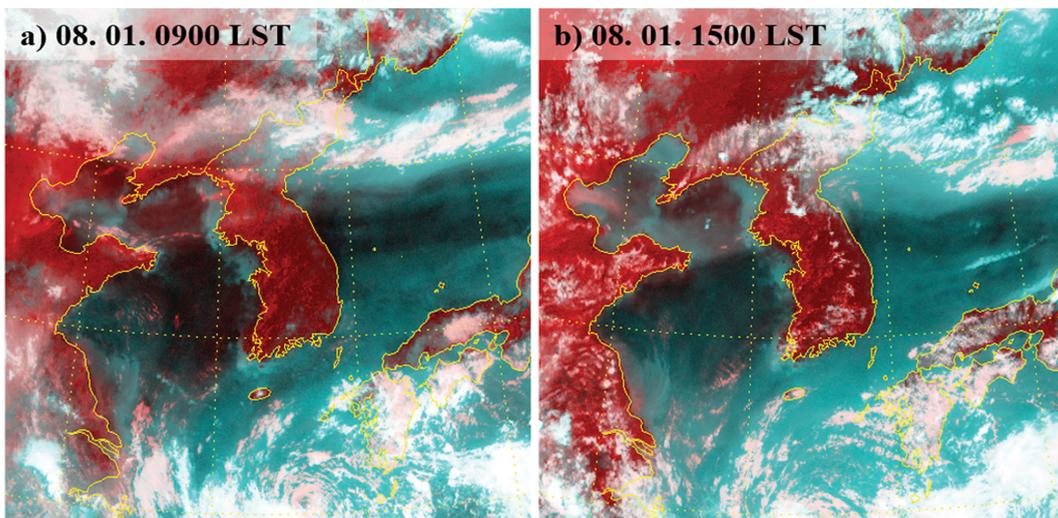


Fig. 3. COMS composited images at (a) 0900 LST and (b) 1500 LST 1 August 2018.

영향을 받고 있음을 알 수 있다. 한편 온도 분포를 보면, 한반도의 서북서쪽에 위치한 몽고지역에 온난역의 중심(30°C)이 위치하고 있으며, 몽고지역에서 시작한 온도 마루(thermal ridge)가 동남동 방향인 한반도 쪽으로 뻗고 있어, 중부이북지역이 남부지역보다 오히려 온도가 약간 더 높음을 알 수 있다. 500 hPa 일기도(Fig. 2c)를 보면, 아열대 고기압의 위치를 보여주는 5880 gpm 등고도선(Bao, 1988; Choi and Byun, 2007)이 중국 내륙과 한반도를 감싸면서 그 중심이 화북지역에 위치하고 있어 우리나라는 아열대 고기압의 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 아열대 고기압의 중심부인 화북지역과 서해 북부 해상에 온난역의 중심(0°C 등온선)이 위치하고 있음을 알 수 있다. Figure 3a는 2018년 8월 1일 0900 LST의 COMS 합성영상이다. 이 영상에서는 하층운은 연한 붉은색 계열, 상층운은 하얀색 계열 그리고 대류운 및 다층운은 보다 밝은 하얀색 계열로 나타난다. 이 영상을 보면, 아열대 고기압의 영향을 받아 강원 북부 이남으로는 구름 없는 맑은 날씨임을 알 수 있으며, 1일 1500 LST (Fig. 3b)에는 강한 일사로 약간의 하층운들이 태백산맥 주위로 흩어져 있음을 알 수 있다.

2.2 관측 자료 분석

ASOS와 AWS자료에 의한 8월 1일 1600 LST의 기온 분포도(Fig. 4a)에서, 태백산맥을 기준으로 동쪽인 영동지역의 기온의 경우, 속초 30.6°C, 북강릉 30.1°C이며, 태백산맥 서쪽 영서지역의 기온의 경우, 인제 36.4°C, 신남 38.1°C, 화촌 39.1°C이었으며, 그리고 홍천에서는 41.0°C로 전국 역대 1위의 일 최고기온 극값을 기록하였다. 이와 같이 8월 1일 1600 LST의 기온을 기준으로 볼 때, 영서지역은 영동지역에 비해 기온이 약 6~10°C 정도 크게 높음을 알 수 있다. Lee (1994)는 열역학적 이론에 근거하여 풍상측과 풍하측의 기온 차이가 5°C 이상인 날을 편 현상이라고 정의하였고, 이번 사례의 경우, 풍상측과 풍하측의 기온 차이가 약 6~10°C 정도로 큰 차이가 났기 때문에, 편에 의한 고온 현상임을 알 수 있다. 또한, 이 고온 현상은 구름이 거의 없는 맑은 날씨에서 일어났기 때문에 수증기 응결에 동반되어 나타나는 습은 열 방출과 관련이 없음을 알 수 있다. 상대습도 분포도(Fig. 4b)를 보면, 영동해안지역에서는 약 70% 이상의 상대습도 역을, 그리고 대부분의 영서지역에서는 약 40% 이하의 상대습도 역을 볼 수 있다. 특히, 내륙 중심에

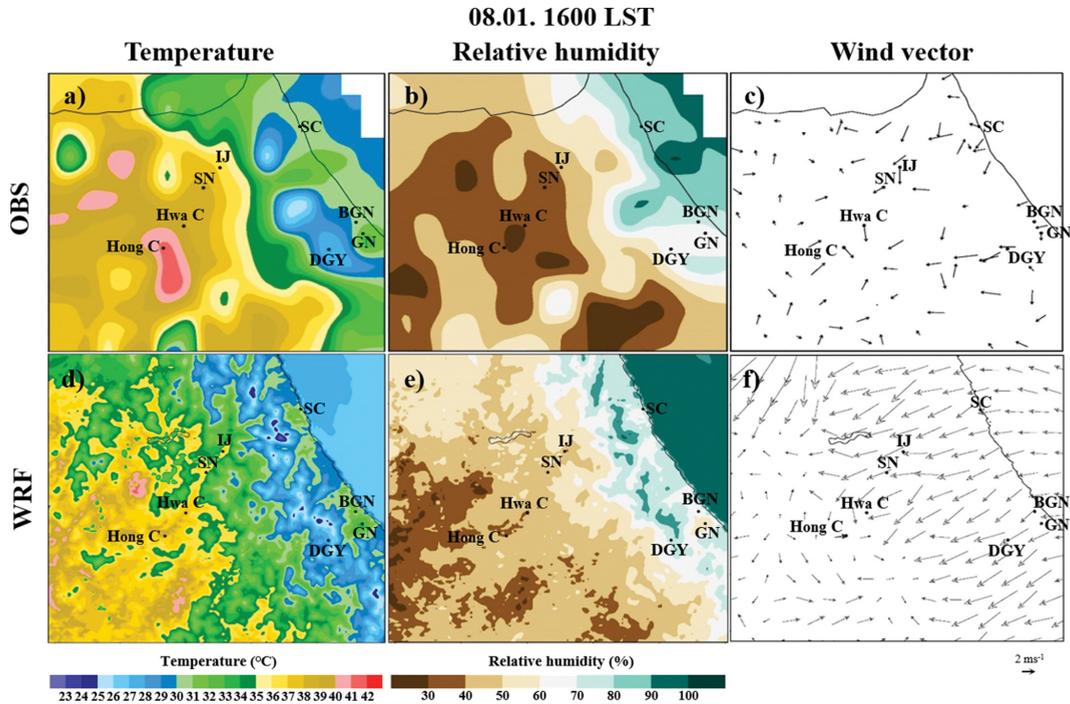


Fig. 4. The distributions of (a, d) temperature, (b, e) relative humidity, and (c, f) wind from observation and the simulation valid at 1600 LST 01 August 2018. The magnitudes of temperature and relative humidity are represented with color shading based on the scale at the bottom of figure. The wind vectors are represented with arrows, and length scale for the arrow in $m s^{-1}$ is given at the bottom of the figure.

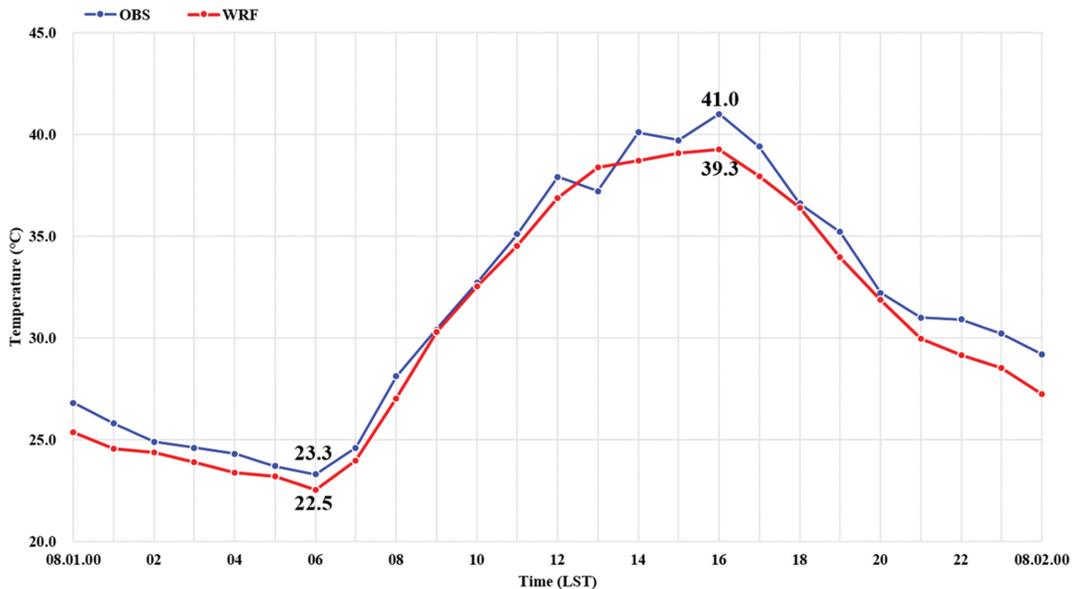


Fig. 5. Time series of temperature ($^{\circ}\text{C}$) at Hongcheon from 0000 LST 1 August to 0000 LST 2 August 2018 from observation and WRF simulation. Blue line and red line stand for the surface air temperature from observation and WRF simulation, respectively.

위치한 홍천 인근에서는 30% 이하의 아주 낮은 상대 습도 역이 위치한다. 바람 장(Fig. 4c)을 보면, 영동지역에서는 대부분 3 m s^{-1} 내외의 북동풍 계열의 바람이 불며, 이 북동풍 계열의 바람은 태백산맥을 넘어 인제와 신남 인근 지역에서도 관측되고 있으며, 그리고 보다 풍하측인 화춘과 홍천에서는 약 3 m s^{-1} 정도의 북풍과 북서풍이 각각 불고 있음을 알 수 있다. 그런데 홍천의 서쪽 인근 지역에서는 남서풍이 약 4 m s^{-1} 내외로 불고 있어 홍천 인근에서 다소 풍향 변화가 있는 모습이다.

Figure 5는 8월 1일의 시간별 홍천관측소의 지상기온(푸른색 실선)과, WRF 수치모델에서 홍천지역 내에서 가장 온도가 높은 지점의 지상기온(붉은색 실선)을 각각 보여준다. 여기서 기온의 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 이다. 관측된 지상기온의 경우, 일출 무렵인 0600 LST (23.3°C)부터 본격적으로 기온이 올라가기 시작하여 1200 LST에 37.9°C 를 기록하였고, 1300 LST에는 기온이 약간 하강한 후, 1400 LST에 40.1°C 를, 그리고 1600 LST에 일 최고기온인 41.0°C 를 기록하였다.

3. WRF 수치모델

3.1 수치모델의 설계

홍천지역을 포함한 강원도지역은 관측망이 조밀하지 않기 때문에 보다 상세한 분석을 하기 위해 WRF

V3.9 중규모 수치모델을 사용하였다. 한반도를 중심으로 3개의 영역을 설정하였고, 각 영역의 수평 격자 간격은 Domain 1 (d01)이 9 km, Domain 2 (d02)는 3 km, Domain 3 (d03)가 1 km이며, 양방향 등지 격자(two way nested grid)로 구성하였다(Fig. 6a). 그리고 Fig. 6b는 공기덩이가 유적을 따라 지나가는 경로 부근의 지형과 지명을 보여준다. 수치모델에서 사용된 물리 과정은 다음과 같다. 구름물리과정은 WDM (WRF Double Moment) 6-class 기법(Lim and Hong, 2010)을 사용하였고, 복사 모수화 방안으로는 장파복사에 대해서는 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM; Mlawer et al., 1997) 방안을, 단파복사에 대해서는 Dudhia 방안(Dudhia, 1989)을 사용하였다. 행성 경계층 과정은 Asymmetric Convective Model (ACM2; Pleim, 2007) PBL (Planetary Boundary Layer)기법을, 그리고 지면 모델과 지표 물리과정은 Pleim 방안(Xiu and Pleim, 2001; Pleim, 2006)을 사용하였는데, 이러한 조합은 관측자료(ascii 자료)를 모델자료(WPS/metgrid)와 혼합하는 방법인 OBSGRID 객관분석을 수행하였을 때에 지표 근처의 오차를 상당히 감소시켜 보다 관측에 가까운 수치모델의 결과를 낼 수 있기 때문이다(Pleim and Gilliam, 2015). 적운 모수화 과정은 new Kain-Fritsch 기법(Kain, 2004)을 d01과 d02에서만 적용하였다. 모델의 초기 및 경계장을 위해 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서 제공하는 6

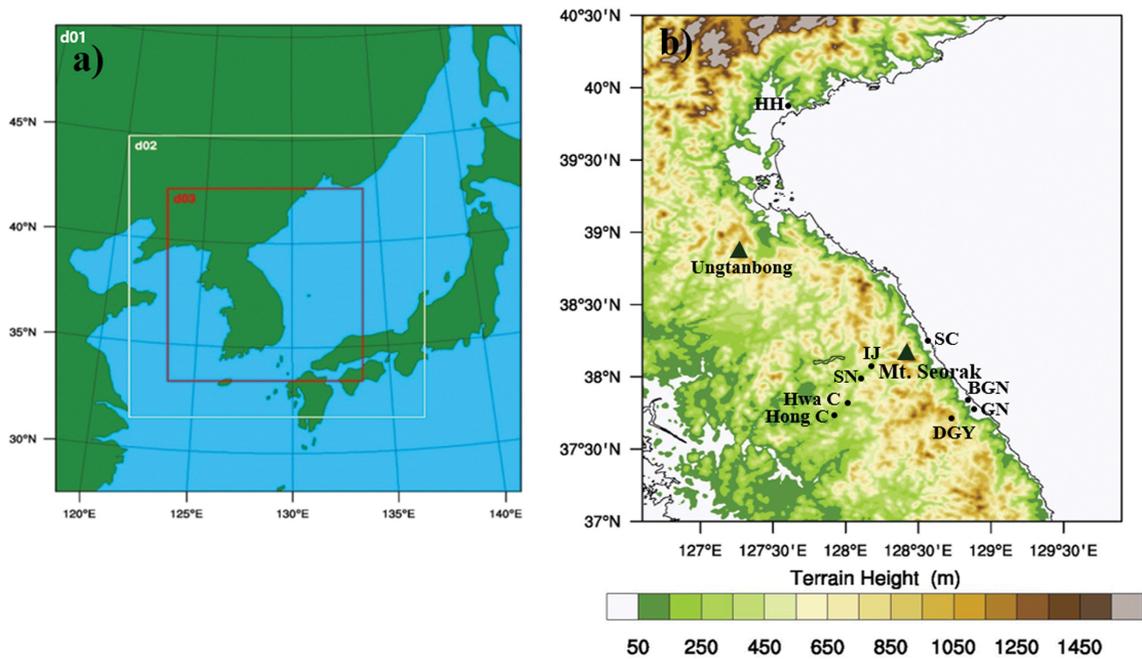


Fig. 6. (a) WRF model domains for domain 1 (d01), domain 2 (d02), and domain 3 (d03). The Fig. 6b shows enlarged details of the analysis area for this study. Hereafter, SC, BGN, GN, DGY, Hong C, Hwa C, SN, IJ, and HH in all the figures stand for Sokcho, Bukgangneung, Gangneung, Daegwallyeong, Hongcheon, Hwachon, Sinnam, Inje, and Hamheung, respectively. The black triangles show the locations of Ungtanbong and mountain Seorak, respectively. Topography is represented with shading based on scale at bottom.

Table 1. Configuration of the WRF model used in the simulations for this study.

Model	WRF V3.6.1		
Domains	Domain1	Domain2	Domain3
Horizontal grid spacing	9 km	3 km	1 km
Vertical layer/Model top	41 Eta vertical layer/50 hPa		
Initial condition	ECMWF reanalysis ERA-Interim (6 hourly, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) RTG SST (daily, $0.083^\circ \times 0.083^\circ$)		
Microphysics	WDM 6 scheme		
Planetary Boundary Layer	ACM2 Planetary Boundary Layer scheme		
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch scheme	not used	
Land Surface Model	Pleim-Xiu Land Surface Model		
Long wave radiation scheme	RRTM scheme		
Short wave radiation scheme	Dudhia scheme		
Grid nesting	Two-way		
Integration period	0900 LST 31 July~0300 LST 2, Aug 2018 (42 hour)		
Nudging	Nudging coefficient	$6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	
	Rinxy	240 km (default value)	
	Time window	0.67 hr	

시간 간격의 ERA-Interim 재분석 자료($0.25^\circ \times 0.25^\circ$)와 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 에서 제공하는 RTG_SST (Real-Time, Global, Sea Surface Temperature) 해수면 온도 자료($0.083^\circ \times 0.083^\circ$)를 이용하였다. 적분 시간은 2018년 7월 31일 0900 LST부터 2018년 8월 2일 0300 LST까지 총 42시간이다(Table 1). 그리고 기상청에서 제공하는 AWS자료와 ASOS자료인 551개 관측 지점의 위·경도, 고도, 2 m 기온, 지표면 온도, 상대습도 그리고 바람 등의 자료를 이용한 OBSGRID 객관분석을 통해 3개의 도메인 영역에 대해 1시간마다 관측 너징(nudging)을 수행하였다(Table 1). 이 사례연구에 주로 사용된 WRF 수치모의 자료는 Domain 3 영역의 1 km 격자자료이다.

3.2 수치모의 분석

3.2.1 관측과 수치모의 비교

Figure 5에서 수치모의의 경우, 일출 무렵인 0600 LST (22.5°C)부터 기온이 올라가기 시작하여 1600 LST에 39.3°C로 최고기온을 기록한 반면에, 관측의 경우, 1600 LST에 41.0°C로 최고기온을 기록하여 수치모의가 약 1.7°C 정도 약간 과소 모의하였음을 알 수 있다.

관측과 수치모의의 지상 기온 분포도(Figs. 4a, d)를 보면, WRF 수치모의와 관측 모두 태백산맥을 기준으

로 동쪽인 영동지역의 해안선을 따라 기온이 30°C 내외이며, 영서지역에서는 기온이 40°C 내외로, 큰 규모의 온도 패턴은 적절히 모의하였음을 알 수 있다. 다만, WRF 수치모의 분해능(1 km)이 관측망의 분해능(약 15 km 내외)보다 매우 조밀하여, WRF 수치모의 분포도가 관측 자료가 보여주는 분포도에 비해 훨씬 더 세밀하고 복잡한 형태를 띠고 있다. 관측과 수치모의의 지상 상대습도 분포도(Figs. 4b, e)에서, 수치모의의 경우, 영동지역에서는 약 70% 이상의 상대습도 역을, 대부분의 영서지역에서는 약 50% 이하의 상대습도 역을, 그리고 좀 더 내륙으로 갈수록 40% 이하의 상대습도 역을 보여줘, 영동지역에서는 관측과 수치모의의 모두 서로 비슷한 습도 분포를 보여주었다. 그러나 영서지역에서는 수치모의의 경우, 관측에 비해 약 10% 정도 더 높게 상대습도를 모의하였다. 관측과 수치모의의 지상 바람 장(Figs. 4c, f)에서 속초, 북강릉, 강릉 그리고 대관령에서의 바람은 관측과 수치모의 모두 유사하게 3 m s^{-1} 내외의 북동풍 계열의 바람이다. 한편, 태백산맥을 넘어 인제와 신남 인근 지역에서도 관측과 수치모의 모두 유사하게 북동풍 계열의 바람이다. 그리고 보다 풍하층에 위치한 화춘에서는 관측과 수치모의 모두 유사하게 3 m s^{-1} 내외의 북풍이 불고있다. 그런데 홍천에서의 풍속의 경우, 관측과 수치모의 모두 약 3 m s^{-1} 정도이나, 풍향의 경

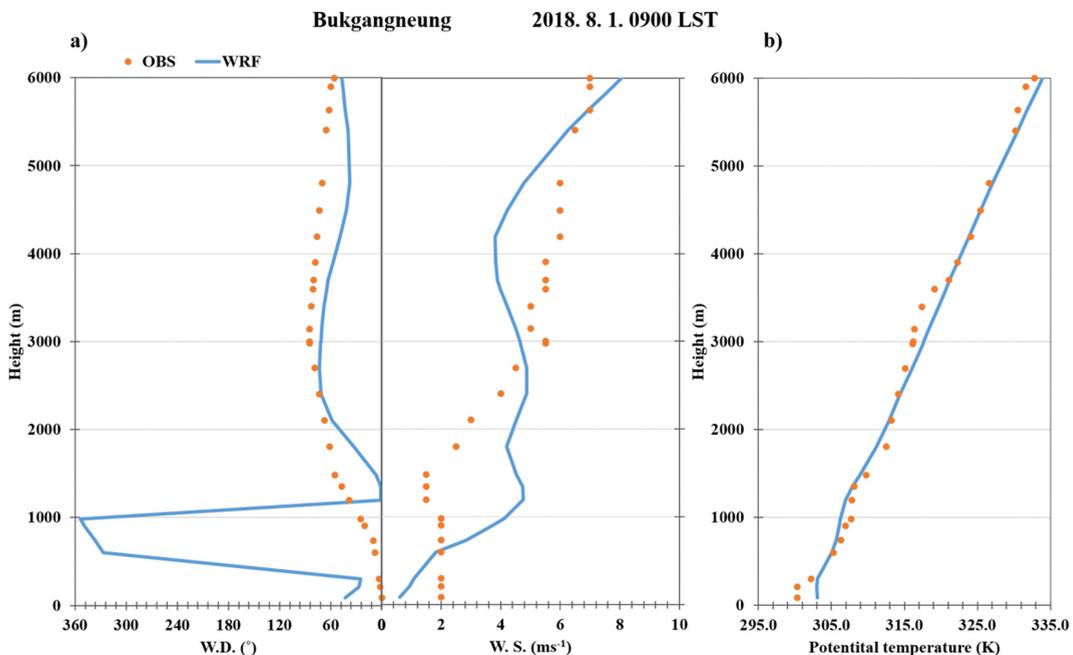


Fig. 7. Vertical profiles of (a) wind direction and wind speed, and (b) potential temperature at 0900 LST 1 August 2018 at Bukgangneung. The observation and the simulation are represented by orange dots and blue-solid lines, respectively.

우, 관측에서는 북서풍이, 그리고 수치모의에서는 서풍으로 모의하여 약간의 차이가 있는 정도이다. 전반적으로 볼 때, 관측 바람장과 수치모의 바람장은 서로 잘 일치한다고 볼 수 있다.

Figure 7은 관측과 수치모의로부터 얻어진 2018년 8월 1일 0900 LST의 북강릉의 풍향과 풍속 그리고 온위의 연직 단면(profile)이다. 먼저, 풍향을 비교해보면, 약 700~1,000 m 고도 사이에서, 관측에서는 북북동 방향인 반면에 수치모의에서는 북서 방향을 모의한 것을 제외하고는, 지상에서 약 6,000 m 고도에 이르기까지 관측과 수치모의 모두 북~북동 방향으로 모의하여 서로 잘 일치하였다. 그리고 풍속을 비교해 보면, 지상에서 6,000 m 고도에 이르기까지 약 2 m s^{-1} 내외의 오차를 보일 정도로 관측을 적절히 모의하였다. 온위의 경우, 비록 모델은 200 m 이하의 고도에서 약 3 K 정도 더 높게 모의하였지만, 대기 저층에서의 안정한 상태를 잘 모의하였다. 또한 200 m 고도에서 약 6,000 m 고도에 이르기까지 모의된 온위는 관측된 온위와 잘 일치하였다. 정리하면, 관측과 수치모의의 비교 결과들을 볼 때, WRF 수치모델이 2018년 8월 1일 홍천의 극 고온 사례를 어느 정도 적절히 수치모의 하였음을 알 수 있다.

3.2.2 수치모의 바람과 온위 분석

공기덩이가 이동한 경로상에서의 대기의 연직 구조

및 변화 그리고 대기 혼합층의 발달 경향을 파악하고자, 8월 1일 1200 LST와 일 최고기온을 기록한 1600 LST의 온위와 U-W에 대한 연직 단면도(홍천을 중심으로 남서-북동 방향으로 자른 단면도; Fig. 10b 참조)를 Fig. 8에 각각 나타내었다. 여기서 U는 단면도상에 투영된 수평바람이다. 1일 1200 LST의 연직단면도(Fig. 8a)를 보면, 산악지형의 저지 효과로 풍상측인 영동지역에서 고도 약 800 m 이하의 기류는 저지되는 모습이다. 그리고 영동지역에서 홍천 부근에 이르기까지 하층의 북동 계열의 기류가 연직으로 갈수록 강하게 나타나고 있다. 310 K 등온위선은 설악산 부근으로 내려오는 모습으로, 이렇게 등온위선이 낮아지는 것은 Type 2 썬(dynamic foehn)의 중요한 특징으로 등온위 끌어내림(isentropic drawdown)을 반영한 것으로 보인다. 그리고 영서지역에서는 아직 잘 발달된 혼합층의 모습은 보이지 않고 있다. 1600 LST의 연직단면도(Fig. 8b)를 보면, 영동지역에서 홍천 부근에 이르기까지 하층의 북동 계열의 기류가 잘 나타나고 있으며, 특히 풍하측으로 갈수록 하강류가 강함을 알 수 있다. 그리고 홍천지역에서는 지면에서부터 약 2.1 km 고도에 이르기까지 뚜렷한 상승 기류가 존재하여, 홍천 주변에서 홍천지역을 향한 수렴성 기류가 지면으로부터 약 1.8 km 고도까지 형성되어 있다. 310 K 등온위선은 1200 LST에 비해 풍하측인 남서쪽으로 더 내려온 모습이고, 지면에서부터 최대 약 2.5

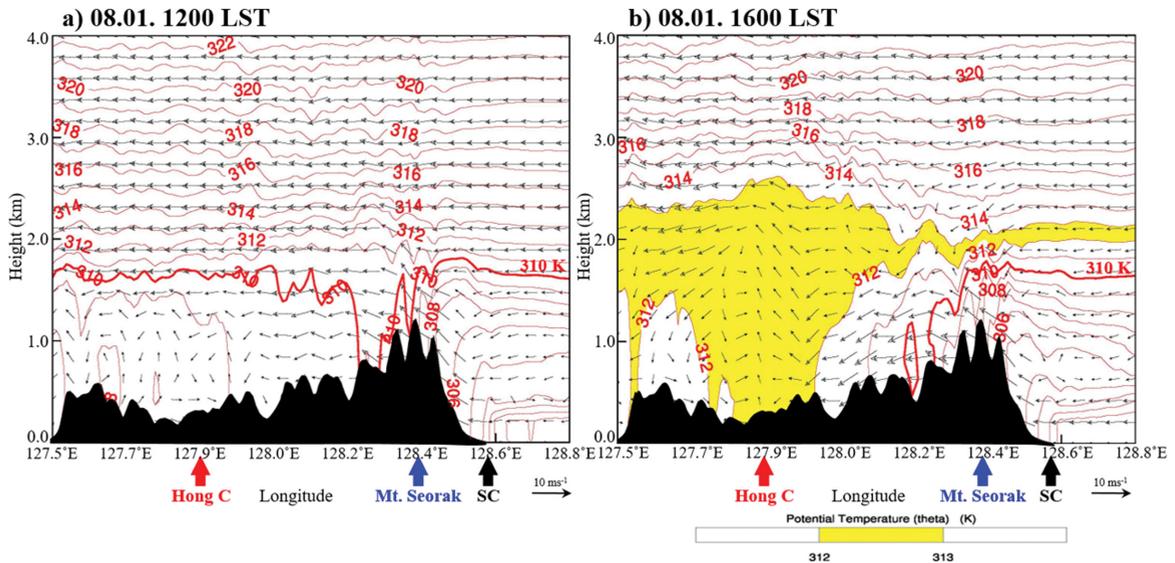


Fig. 8. The vertical cross sections (along the line A-B in Fig. 10b) of wind (m s^{-1} , arrows) and potential temperature (K, contours) at (a) 1200 LST and (b) 1600 LST 1 August 2018. Specially, the sector of potential temperature between 312 K and 313 K is represented with color shading based on the scale at the bottom of the figure. The wind vectors in Figs. 8a and 8b are wind vectors projected to the cross-section, and length scale for the vectors in m s^{-1} is given at the bottom of the figure.

km 고도에 이르기 까지 형성된 312 K~313 K 온위역(노란색 음영)의 중심이 홍천지역에 위치하여 이 지역에서 혼합층이 잘 발달하였음을 알 수 있으며, 이 시간대에 일 최고기온이 관측되었다. 이렇게 일중에 혼합층이 발달한 주요 요인으로 지표 느낌열 플럭스에 의한 비단열 가열을 들 수 있다(Takane and Kusaka, 2011). Stull (1988)은 연직 방향으로 균일하게 나타나는 온위의 분포가 주간에 육지에서 발달하는 혼합층의 특징이라고 하였으며, 혼합층이 발달하기 위한 요인은 지표 느낌열 플럭스에 의한 가열(비단열 가열)과 외부로부터 유입되는 열 유입(Entrainment)에 의한 가열이라고 언급한 바 있다.

3.3 후방 유적 및 라그랑주 에너지 수지 분석

3.3.1 후방 유적 분석

먼저, WRF 고분해능 수치모의 자료를 입력 자료로 하여, NCAR (National Center for Atmospheric Research) Graphics의 RIP (Read/Interpolate/Plot) version 4.6 (Stoelinga, 2009)을 구동하여 공기덩어리의 경로, 공기덩어리의 고도와 기온 등을 계산하였다. 여기서 유적은 10분 간격으로 공간적, 시간적으로 선형 내삽하여 기상변수를 계산하였다. 후방 유적을 계산하는 최초 기준 시간은 일 최고기온이 관측된 시각(8월 1일 1600 LST)이다. 그리고 하나의 공기덩어리를 대상으로 유적 분석 및 라그랑주 에너지 수지 분석을 하는 것

은, 기류의 난류적인 특성상 불확실성이 다소 크므로 많은 공기덩어리들을 대상으로 한 평균값을 갖고 분석하는 것이 보다 의미 있을 것으로 여겨진다. 이에 따라, 홍천지역 81 km²에 걸치는 총 100개의 격자점(10 × 10)에 도달하는 공기덩어리들을 대상으로 31시간 동안의 후방 유적을 각각 구하였다.

Figure 9a는 100개의 공기덩어리들이 7월 31일 0900 LST에서 출발하여 8월 1일 1600 LST에 홍천지역으로 이동하는 경로(후방 유적)들을 보여주는 그림이다. 후방 유적 분석에 따르면, 8월 1일 1600 LST에 홍천지역의 지면 부근에 있었던 공기덩어리들은 대부분 강원 북부지역과 함경남도 및 그 앞바다 상공 최대 약 3 km 고도 내외로부터 이동해 왔으며, 100개의 공기덩어리들의 유적은 수평적으로 그리고 연직적으로 큰 분산을 보인다. 참고로, 총 100개의 유적 중에서 15개의 유적은 평균 기류의 흐름과는 크게 달라 분석에서 제외하였다. 공기입자들의 출발 고도 분포를 보여주는 Fig. 9b를 보면, 대략 1,400 m 부근의 고도에서 공기덩어리들의 개수가 가장 작기 때문에, 1,400 m 이상의 고도에서 출발하는 유적들(47개; Fig. 10a)과 1,400 m 이하의 고도에서 출발하는 유적들(38개; Fig. 10c)로, 두 개의 그룹으로 나누었다. 먼저, 1,400 m 이상의 고도에서 출발하는 유적 멤버들을 앙상블 평균한 유적(Fig. 10b)을 보면, 함흥 앞바다 상공에서 시작하여 강원 북부 해안을 따라 남동진 한 후, 속초 인근 해안

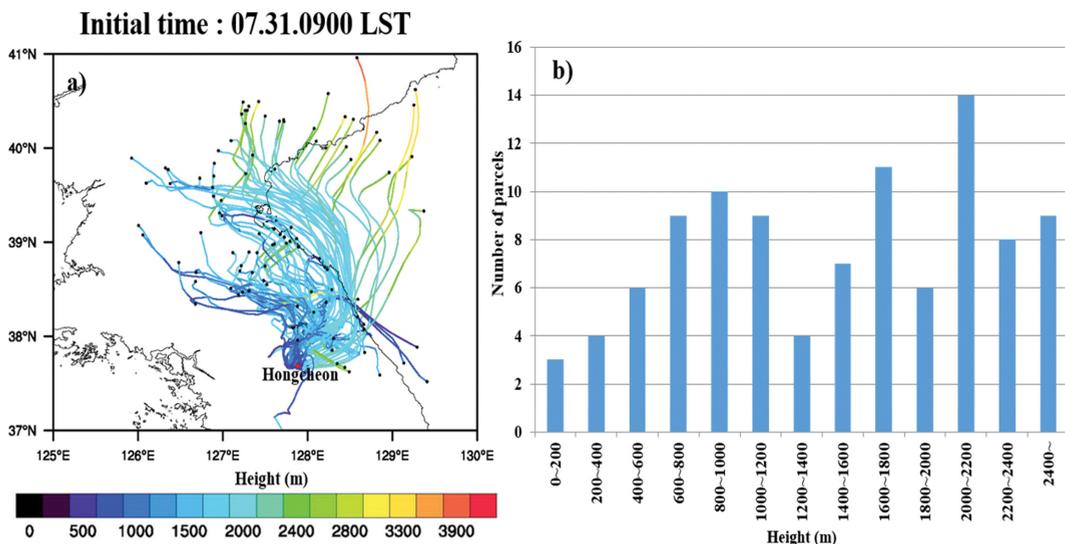


Fig. 9. (a) The backward trajectories of 100 air parcels released from near the surface in a model grid around Hongcheon (see text for details). The heights of air parcels along trajectories are represented with color shading based on the scale at the bottom of the figure. Black dot in Fig. 9a stands for an initial location of the trajectory of each air parcel. (b) The histogram showing altitudinal ranges (x-axis) at which air parcels are located at 0900 LST 31 July 2018 versus number of the air parcels located at the range (y-axis).

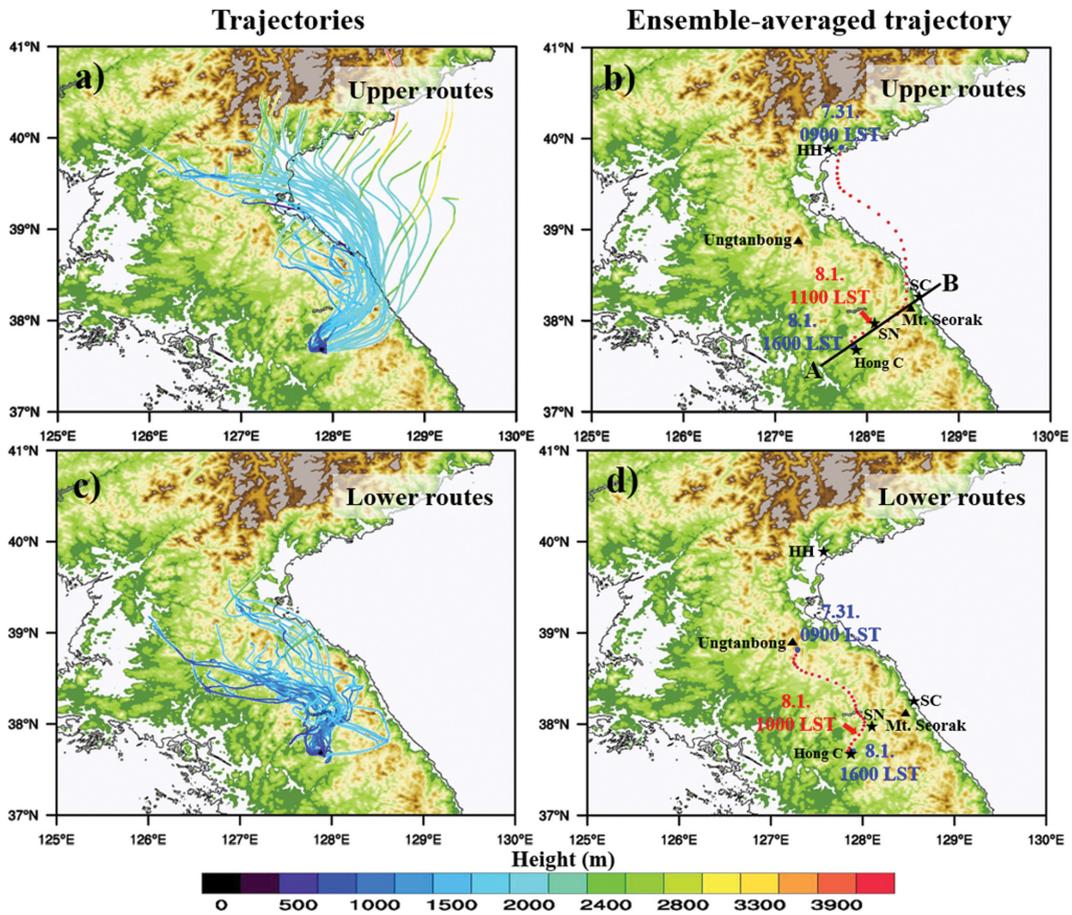


Fig. 10. The backward trajectories of (a) 47 air parcels along the upper routes and (c) 38 air parcels along the lower routes, and the ensemble-averaged trajectories of air parcels along (b) the upper routes and (d) the lower routes. The heights of air parcels along trajectories in Figs. 10a and 10c are represented with color shading based on the scale at the bottom of the figure. The small red dots and numbers in blue in Figs. 10b and 10d stand for air parcels' location at every 1 hour, and initial and final times of the backward trajectories. Numbers with arrow in red stand for the time when the air parcel penetrated into the mixing layer, and the arrow indicates a location of the air parcel. The A-B line in Fig. 10b represents the path of vertical cross section used in Fig. 8 (see text for details).

에서 내륙으로 유입된 후 태백산맥을 넘어 북동 기류를 따라 서남서진하여 신남을 거쳐 홍천지역으로 유입되는 경로[이하, 상부경로(Upper routes)라고 명함]를 따른다는 것을 알 수 있다. 여기서 붉은 색의 날짜와 시각은 혼합층으로 유입된 날짜와 시각을, 그리고 화살표는 그 시각의 공기덩이의 위치를 각각 나타낸다. 한편, 1,400 m 이하의 고도에서 출발하는 유적 멤버들을 앙상블 평균한 유적(Fig. 10d)을 보면, 강원 내륙 북부 산악지역(웅탄봉) 상공에서 시작하여, 중부 내륙 산지를 따라 태백산맥과 거의 평행하게 남동진한 후, 신남 부근에서 북동 기류를 따라 남서진하여 홍천지역으로 유입되는 경로[이하, 하부경로(Lower

routes)라고 명함]를 각각 따른다는 것을 알 수 있다. 그런데 기온이 급상승하게 되는 시간대(8월 1일 1000~1600 LST)에는, 상부 경로와 하부 경로를 따르는 두 공기덩이들 모두 신남 부근에서 홍천으로 이동하여 북동 기류를 따라 움직인 것을 볼 수 있다.

3.3.2 라그랑주 에너지 수지 분석

2018년 8월 1일에 홍천지역으로 유입되는 북동풍 바람과 관련된 편 그리고 유사 편이 고온 사례에 기여하는 정도를 양적으로 조사하기 위해 각 경로를 따라 라그랑주 에너지 수지 분석을 수행하였다. 강원지역은 강수현상이 없는 대체로 맑은 날씨이었기 때문

에 숨은열 효과는 고려하지 않은 건조 정적 에너지(dry static energy; $J\ kg^{-1}$)를 계산하여 라그랑주 에너지 수치를 분석하였다.

$$s = C_p T + gZ \tag{1}$$

식(1)에서 s , $C_p T$ 그리고 gZ 는 건조 정적 에너지, 느껴열(sensible heat) 에너지 그리고 지위(geopotential) 에너지를 각각 나타낸다. g 는 중력 가속도로 $9.8\ m\ s^{-1}$, C_p 는 정압 비열로 $1004\ J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ 이다. 정적이며 단열적인 경우, 건조 정적 에너지 s 는 하나의 보존되는 양이다.

공기덩이에 작용하는 비단열 가열은 일반적으로 1) 수증기 응결, 2) 복사, 3) 아격자 규모의 난류 확산(subgrid-scale turbulent diffusion), 그리고 4) 지표면으로부터의 느껴열 플럭스에 의해 일어난다. 이 연구 사례의 경우, 맑은 날씨에서 발생한 고온 현상이므로 수증기 응결에 의한 비단열 가열 효과는 제외하였고, 또한, 태양 복사가 공기덩이에 직접 작용하는 가열 효과는 일반적으로 작기 때문에 무시하였다(Takane and Kusaka, 2011). 따라서 이 연구 사례의 경우, 비단열 가열은 지면으로부터의 느껴열 플럭스와 아격자 규모의 난류 확산에 의해 이루어진다고 볼 수 있다.

Figure 11은 상부 경로(Fig. 11a)를 따르는 47개의 공기덩이들과 하부 경로(Fig. 11b)를 따르는 38개의

공기덩이들의 매 시각의 에너지값들을 각각 평균한 라그랑주 평균 에너지 수치를 보여준다. 여기서 느껴열 에너지 $C_p T$ 는 붉은색 실선, 지위 에너지 gZ 는 검은색 실선, 그리고 건조 정적 에너지 s 는 푸른색 실선으로 각각 표시하였다. 그런데 단열과정하에서는 $C_p T$ 와 gZ 는 서로 반비례하므로 상대적인 관계를 보기 쉽게 하기 위해 $C_p T$ 를 음(-)으로 나타내었다. 그리고 혼합층으로 유입된 시각은 노란색 화살표로 나타내었으며, 그림에서 숫자는 혼합층으로 유입 시의 기온과 홍천지역 도착 시의 기온을 각각 나타낸다. 참고로, 바람이 약하고 맑은 날의 경우 PBL 고도는 혼합층 고도에 대응하므로(Stull, 2017) 이 연구에서 PBL 고도를 혼합층 고도로 사용하였다.

상부 경로(Fig. 11a)를 따르는 평균된 공기덩이의 경우, 지위 에너지 gZ 는, 공기덩이들이 8월 1일 0000 LST부터 8월 1일 1100 LST에 이르는 동안에 자유 대기(free atmosphere) 안에서 약 1,200 m 내외의 고도를 유지하면서 이동하였으며, 혼합층으로 유입되는 1일 1100 LST의 평균된 공기덩이의 온도는 21.8°C이었다. 그리고 이 시각 이후부터 공기덩이들은 다소 급격히 하강하면서 1600 LST경에 홍천지역 지면 가까이 접근하였으며, 이 때의 평균된 공기덩이의 온도는 37.3°C이었다. 이러한 지위 에너지 gZ 의 감소는 느껴열 에너지 $C_p T$ 가 증가하는데 기여하여, $C_p T$ 와 gZ 의 시간

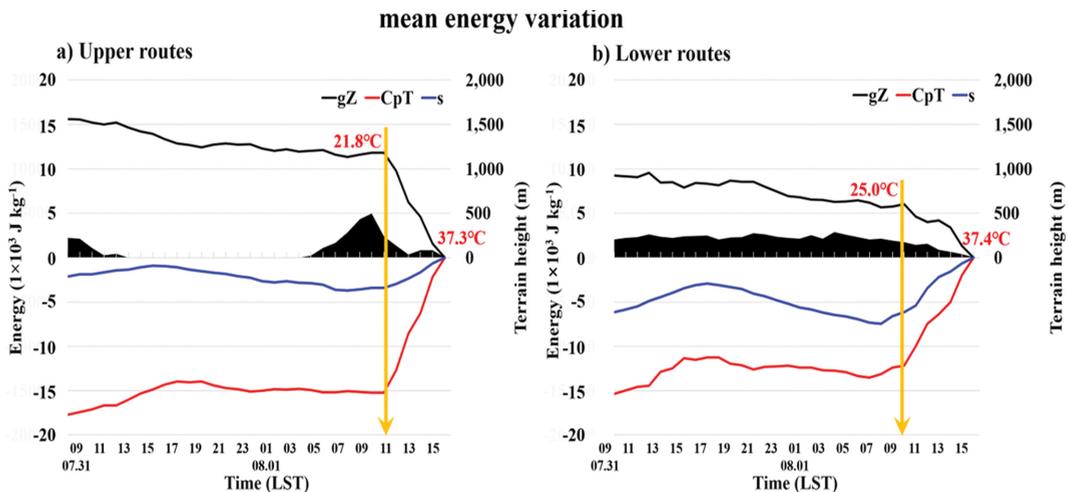


Fig. 11. Energy terms ($1 \times 10^3\ J\ kg^{-1}$) along the ensemble averaged trajectories of air parcels shown in (a) for Upper routes and (b) for Lower routes. The y axis indicates energy ($1 \times 10^3\ J\ kg^{-1}$), and the secondary y axis indicates the terrain height (m). The black curve is the geopotential energy (gZ), the red curve is the sensible heat energy ($C_p T$), the blue curve is the dry static energy (s), and the black shading is the terrain along the ensemble averaged trajectory. The yellow vertically long arrow indicates the time when the air parcel penetrated from the free atmosphere into the mixing layer. A number near the yellow arrow stands for temperature when the air parcel penetrated into the mixing layer, and the other number stands for temperature when the air parcel reached finally around Hongcheon.

Table 2. The mean energy variations while the air parcels keep moving in the mixing layer to reach around Hongcheon along the Upper routes and along the Lower routes, respectively. Temperature increases of averaged air parcels due to these energy variations are shown in parenthesis (see text for details).

(Unit: J kg⁻¹)

	gZ	$C_p T$	s
Upper routes	11.886×10^3 (11.8°C)	15.536×10^3 (15.5°C)	3.650×10^3 (3.6°C)
Lower routes	6.111×10^3 (6.1°C)	12.406×10^3 (12.4°C)	6.295×10^3 (6.3°C)

에 따른 변화 경향은 서로 반비례하는 모습을 보여준다. 건조 정적 에너지 s 는 8월 1일 0000 LST부터 1100 LST에 이르는 동안에는 거의 일정하다가 1100 LST 이후부터 서서히 증가하였다. 이러한 비단열 에너지의 증가는 아격자 규모 난류 확산과 지면으로부터의 느낌열 플럭스에 의한 것으로 볼 수 있다. Table 2는 혼합층으로 유입된 후 1600 LST까지 일어난 지위 에너지, 느낌열 에너지, 그리고 건조 정적 에너지의 변화량을 정량적으로 보여준다. 그리고 이 에너지들을 C_p ($1.004 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)로 나누면, 평균된 공기덩이의 온도 증가량을 얻을 수 있어, 각 에너지값 옆에 해당하는 온도 증가량을 괄호 안에 나타내었다. Table 2에서, 상부 경로의 경우, 혼합층의 영향을 받는 1일 1100 LST 이후부터 1600 LST까지 공기덩이의 지위 에너지의 감소량은 $11.886 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$, 그리고 느낌열 에너지의 증가량은 $15.536 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$ 이다. 여기서 느낌열 에너지의 증가량과 지위 에너지의 감소량의 차이가 건조 정적 에너지의 증가량이 된다. 따라서 혼합층의 영향을 받는 1일 1100 LST 이후부터 1600 LST까지 건조 정적 에너지의 증가량은 $3.650 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$ 으로 비단열 가열 에너지이다. 따라서 양상블 평균된 공기덩이가 혼합층으로 유입된 후 얻은 느낌열 에너지 증가량의 약 77% [$=(11.886 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}) / (15.536 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}) \times 100$]는 지위 에너지의 감소에 따른 단열 압축 가열(Type 2: dynamic foehn)이 담당할 것으로 볼 수 있으며, 나머지 약 23% [$=(3.650 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}) / (15.536 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}) \times 100$]는 비단열 가열(Type 3: foehnlike wind)이 담당할 것으로 볼 수 있다. 이러한 비율로 볼 때, 상부 경로를 따르는 평균된 공기덩이의 온도가 증가함에 있어, 비단열 가열보다 단열 가열이 보다 지배적으로 작용하였음을 알 수 있으나, 비단열 가열 역시 홍천지역의 극 최고기온에 도달하는데 있어 어느 정도 중요한 역할을 하였음을 알 수 있다. 이러한 결과는 2018년 7월 23일 일본 구마가야에서 일어난 기록적인 극 고온 사례에 대한 Nishi and Kusaka (2019)의 라그랑주 평균 에너지 수치 분석 결과와 유사하였다.

한편, 하부 경로(Fig. 11b)를 따르는 평균된 공기덩이의 경우, 지위 에너지 gZ 는, 8월 1일 0000 LST 부

터 시작하여 1000 LST에 이르는 동안에 서서히 감소하는 움직임을 보인다. 혼합층으로 유입되는 시각인 1000 LST의 평균된 공기덩이의 온도는 25.0°C이었으며 이 시각 이후부터 gZ 는 계속 감소하다가 1600 LST에 홍천지역에 도달하였으며 이 때의 평균된 공기덩이의 온도는 37.4°C이었다. 느낌열 에너지와 건조 정적 에너지의 경우, 혼합층으로 진입한 시간대인 1일 1000 LST 이후부터 홍천 인근 지면으로 접근한 1600 LST까지 모두 급격하게 증가하는 모습을 보인다. Table 2에서, 하부 경로의 경우, 혼합층으로 유입된 후 1600 LST까지 발생한 공기덩이의 지위 에너지의 감소량은 $6.111 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$, 느낌열 에너지의 증가량은 $12.406 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$, 그리고 공기덩이가 받은 비단열 건조 정적 에너지의 증가량은 $6.295 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$ 이다. 따라서 평균된 공기덩이가 얻은 느낌열 에너지 증가량의 약 49% [$=(6.111 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}) / (12.406 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}) \times 100$]는 단열 압축 가열(Type 2)이 담당할 것으로 볼 수 있으며, 나머지 약 51% [$=(6.295 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}) / (12.406 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}) \times 100$]는 비단열 가열(Type 3)이 담당할 것으로 볼 수 있다. 이러한 비율로 볼 때, 하부 경로를 따르는 평균된 공기덩이의 기온 증가에 있어, 압축에 의한 단열 가열과 그리고 지면으로부터의 느낌열 플럭스 및 난류 확산에 의한 혼합과 관련된 비단열 가열이 거의 동등하게 평균된 공기덩이의 온도 증가에 기여하였음을 알 수 있다.

위에서 언급한 것처럼 비단열 가열이 상부 경로와 하부 경로를 따르는 공기덩이들의 온도 증가에 모두 기여 하였으므로, 홍천지역으로 유입된 북동 기류는 Takane and Kusaka (2011)가 제안한 Type 4 편 바람(Fig. 1 참조; Type 2와 Type 3가 결합된 편)에 해당된다고 할 수 있다. 따라서 Type 4 편 바람의 메커니즘이 홍천지역의 기온을 증가시키는데 중요한 역할을 하였음을 알 수 있다.

상부 경로와 하부 경로를 따르는 공기덩이들에 작용한 지위 에너지, 느낌열 에너지 그리고 건조 정적 에너지를 상호 비교해보면, 상부 경로를 따르는 공기덩이의 경우, 혼합층으로 유입되는 시각의 평균된 공기덩이의 온도는 21.8°C, 그리고 1600 LST경에 홍천 인근 지면 부근에 도달하였을 때의 평균된 공기덩이

의 온도는 37.3°C이었으므로, 혼합층으로 유입되어 홍천지역으로 도착할 때까지 증가한 온도는 15.5°C이었다. 그 중에서 지위 에너지 gz 에 의해 증가된 온도는 약 11.8°C이며, 비단열 에너지(건조 정적 에너지 s 의 변화량)에 의하여 증가된 온도는 약 3.6°C이었다. 하부 경로의 경우, 혼합층으로 유입되는 시각의 평균된 공기덩이의 온도는 25.0°C, 그리고 1600 LST경에 홍천 인근 지면 부근에 도달하였을 때의 평균된 공기덩이의 온도는 37.4°C이었으므로, 혼합층으로 유입되어 도착할 때까지 증가된 온도는 12.4°C이었다. 그 중에서 지위 에너지 gz 에 의하여 증가된 온도는 약 6.1°C이며, 비단열 에너지에 의하여 증가된 온도는 약 6.3°C이었다. 그런데 하부 경로를 따르는 동안에 공기덩이가 증가한 온도는 약 12.4°C로, 상부 경로를 따르는 동안에 공기덩이가 증가한 온도인 약 15.5°C와 비교해보면, 약 3.1°C 작았으나, 하부 경로를 따르는 공기덩이의 경우, 혼합층으로 유입될 때의 온도가 25.0°C로 상부 경로를 따르는 공기덩이의 21.8°C에 비해 약 3.2°C 정도 높았기 때문에 하부 경로를 따라 공기덩이가 홍천에 도달하였을 때의 온도는 약 0.1°C 정도 약간 더 높은 온도를 보여주었다.

4. 요약 및 결론

아열대 고기압의 영향과 편 효과로 2018년 8월 1일 1600 LST에 홍천 관측소에서 47년만에 가장 높은 일 최고기온인 41.0°C를 기록하였다. 홍천지역의 극고온 현상과 관련된 여러 유형의 편 의 기여도를 양적으로 조사하기 위해 후방 유적 분석과 라그랑주 평균 에너지 수치 분석을 수행하였다. 홍천지역에서 100개의 공기덩이를 방출하여 수행한 후방 유적 분석 결과, 약 1,400 m 이상의 고도에서 출발한 공기덩이가 강원 영동해안에서 태백산맥을 가로질러 홍천지역으로 넘어오는 상부 경로(47개 멤버의 후방 유적)와, 1,400 m 이하의 고도에서 보다 낮은 고도에서 출발한 공기덩이가 태백산맥의 서쪽 중부 내륙 산지를 따라 홍천지역으로 이동하는 하부 경로(38개 멤버의 후방 유적)로 분류되었다.

라그랑주 평균 에너지 수치 분석 결과, 상부 경로의 경우, 양상블 평균된 공기덩이가 혼합층으로 유입된 후 얻은 느낌열 에너지($15.536 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$)의 77%는 지위 에너지의 감소에 따른 단열 압축 가열($11.886 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$; Type 2)이 담당하였으며, 나머지 23%는 지면으로부터의 느낌열 플럭스 및 난류 확산에 의한 혼합에 의한 비단열 가열($3.650 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$; Type 3)이 담당하여, 단열 압축 가열이 보다 더 큰 기여를 하였다. 반면에 하부 경로의 경우, 양상블 평균된 공기덩이가 혼합층으로 유입된 후 얻은 느낌열 에너지

($12.406 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$)의 49%는 단열 압축 가열($6.111 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$; Type 2)이 담당하였으며, 나머지 51%는 비단열 가열($6.295 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$; Type 3)이 담당하였다. 이러한 비율로 볼 때, 압축에 의한 단열 가열과 그리고 비단열 가열이 거의 동등하게 공기덩이의 온도 증가에 기여하였음을 알 수 있다. 정리하면, 평균된 공기덩이들에 작용한 단열 가열(Type 2: dynamic foehn)은 상부 경로(하부 경로)를 따르는 경우, 총 가열의 77% (49%) 정도를 차지하였으며, 비단열 가열(Type 3: foehnlike wind)은 총 가열의 23% (51%) 정도를 차지하였다. 따라서 상부 경로와 하부 경로와 관계없이, Type 2와 Type 3가 결합된 Type 4 편 의 메커니즘이 홍천지역에서 기록적인 극 최고기온이 발생하는데 있어, 중요한 역할을 하였음을 알 수 있었다. 그리고 하부 경로를 따라 움직이는 공기덩이의 혼합층내에서의 비단열 가열량은, 상부 경로를 따라 움직이는 공기덩이의 혼합층내에서의 비단열 가열량의 약 1.7배로, 하부 경로를 따라 움직이는 공기덩이의 경우, 상부 경로에 비해 상대적으로 더 많은 비단열 가열을 받았음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업(NRF-2018R1D1A1B07042652)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Arakawa, S., 1969: Climatological and dynamical studies on the local strong winds, mainly in Hokkaido, Japan. *Geophys. Mag.*, **34**, 349-425.
- Back, S.-Y., S.-W. Kim, M.-I. Jung, J.-W. Roh, and S.-W. Son, 2018: Classification of heat wave events in Seoul using self-organizing map. *J. Climate Change Res.*, **9**, 209-221, doi:10.15531/KSCCR.2018.9.3.209 (in Korean with English abstract).
- Bao, C.-L., 1988: *Synoptic Meteorology in China*. Springer, 317 pp.
- Barry, R. G., 1992: *Mountain weather and climate (Physical Environment) 2nd ed.* Routledge, 402 pp.
- _____, 2008: *Mountain weather and climate 3rd ed.* Cambridge University Press, 532 pp.
- Beran, D. W., 1967: Large amplitude lee waves and chinook winds. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **6**, 865-877, doi:10.1175/1520-0450(1967)006<0865:LALWAC>2.0.CO;2.
- Brinkmann, W. A. R., 1973: A climatological study of strong downslope winds in the Boulder area. NCAR Cooperative Thesis No. 27, INSTARR occasional

- Paper No. 7, 229 pp.
- _____, 1974: Strong downslope winds at Boulder, Colorado. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 592-602.
- Byun, H. R., H. S. Hwang, and H. Y. Go, 2006: Characteristics and synoptic causes on the abnormal heat occurred at Miryang in 2004. *Atmosphere*, **16**, 187-201 (in Korean with English abstract).
- Choi, G., and W.-T. Kwon, 2005: Spatial-temporal patterns and recent changes of tropical night phenomenon in South Korea. *J. Korean Geograph. Soc.*, **40**, 730-747 (in Korean with English abstract).
- Choi, K.-S., and H.-R. Byun, 2007: Definition of the onset and withdrawal of the warm season over east Asia and their characteristics. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 143-159.
- Choi, S.-S., S.-E. Moon, and C.-H. Ha, 1997: Climatological characteristics of the Nopsae wind. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 349-361 (in Korean with English abstract).
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a meso-scale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Elvidge, A. D., and I. A. Renfrew, 2016: The causes of foehn warming in the lee of mountains. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 455-466, doi:10.1175/BAMS-D-14-00194.1.
- Ficker, H. V., 1910: Innsbrucker föhnstudien IV. Weitere beiträge zur dynamik des föhns. *Denkschr. Kaiserl. Akad. d. Wiss., math.-natwiss. Kl.*, **85**, 114-173.
- Gaffin, D. M., 2002: Unexpected warming induced by foehn winds in the lee of the Smoky Mountains. *Wea. Forecasting*, **17**, 907-915, doi:10.1175/1520-0434(2002)017<0907:UWIBFW>2.0.CO;2.
- Hann, J., 1866: Zur frage über den ursprung des föhn. *Z. Österr. Ges. Meteor.*, **1**, 257-263.
- _____, 1867: Der föhn in den österreichischen Alpen. *Z. Österr. Ges. Meteor.*, **2**, 433-445.
- _____, 1901: *Lehrbuch der meteorologie. 1st ed.* Leipzig, 805 pp.
- Ikawa, M., and Y. Nagasawa, 1989: A numerical study of a dynamically induced foehn observed in the Abashiri-Ohmu area. *J. Meteor. Soc. Japan, Ser. II*, **67**, 429-458.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **43**, 170-181.
- Kim, H.-G., K.-D. Min, I.-H. Yoon, Y.-S. Moon, and D.-I. Lee, 1998: Characteristics of the extraordinary high temperature events occurred in Summers of 1987 and 1994 over the Korean Peninsula. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 47-64 (in Korean with English abstract).
- Kim, J., D.-G. Lee, and J. Kysely, 2008: A synoptic and climatological comparison of record-breaking heat waves in Korea and Europe. *Atmosphere*, **18**, 355-365 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y., and M. K. Kim, 2013: A study on foehn over Hongcheon area of Gangwon province in South Korea. *J. Korean Geograph. Soc.*, **48**, 37-55 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., and S.-G. Hong, 1996: A study of quasi-Foehn in the Youngdong-district in late spring or early summer. *J. Korean Meteor. Soc.*, **32**, 593-600 (in Korean with English abstract).
- Kondo, J., and T. Kuwagata, 1983: On the unusual dryness and strong wind weather which caused a large number of forest fires over the Tohoku district on 27 April 1983 (Part 1). *Tenki*, **30**, 545-552 (in Japanese).
- _____, and _____, 1984: On the unusual dryness and strong wind weather which caused a large number of forest fires over the Tohoku district on 27 April 1983 (Part 2). *Tenki*, **31**, 37-44 (in Japanese).
- KMA, 2018: *Press Release*. Korea Meteorological Administration, 3 pp [Available online at https://www.kma.go.kr/notify/press/kma_list.jsp?bid=press&mode=view&num=1193576&page=1&field=&text=] (in Korean).
- Lee, H.-D., K.-H. Min, J.-H. Bae, and D.-H. Cha, 2020: Characteristics and comparison of 2016 and 2018 heat wave in Korea. *Atmosphere*, **30**, 1-15, doi:10.14191/Atmos.2020.30.1.001 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-Y., 1994: The Nopsae; a Foehn type wind over the Young Suh region of central Korea. *J. Korean Geograph. Soc.*, **29**, 266-280 (in Korean with English abstract).
- Lim, K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612, doi:10.1175/2009MWR2968.1.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **102**, 16663-16682.
- Nishi, A., and H. Kusaka, 2019: Effect of foehn wind on record-breaking high temperature event (41.1°C) at Kumagaya on 23 July 2018. *SOLA*, **15**, 17-21, doi:

- 10.2151/sola.2019-004.
- Park, B. I., 2020: Types and characteristics of the foehn phenomena over the Young-seo region of Central Korea. *J. Korean Geograph. Soc.*, **55**, 67-81 (in Korean with English abstract).
- Park, W.-S., and M.-S. Suh, 2011: Characteristics and trends of tropical night occurrence in South Korea for recent 50 years (1958-2007). *Atmosphere*, **21**, 361-371, doi:10.14191/Atmos.2011.21.4.361 (in Korean with English abstract).
- Pleim, J. E., 2006: A simple, efficient solution of flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **45**, 341-347.
- _____, 2007: A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. part I: Model description and testing. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 1383-1395.
- _____, and R. Gilliam, 2015: Description and Procedures for using the Pleim-Xiu LSM, ACM2 PBL and Pleim Surface Layer Scheme in WRF. 8pp [Available online at <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/PX-ACM.pdf>].
- Richner, H., and P. Hächler, 2013: Understanding and forecasting Alpine foehn. In F. Chow et al. Eds., *Mountain Weather Research and Forecasting: Recent Progress and Current Challenges*, Springer, 219-260.
- Scorer, R. S., 1978: *Environmental Aerodynamics (Ellis horwood series in mathematics and its applications)*. Halsted Press, 488 pp.
- _____, and H. Klieforth, 1959: Theory of mountain waves of large amplitude. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **85**, 131-143.
- Seibert, P., 1990: South foehn studies since the ALPEX experiment. *Meteor. Atmos. Phys.*, **43**, 91-103, doi: 10.1007/BF01028112.
- Sharples, J.-J., G. A. Mills, R. H. D. McRae, and R. O. Weber, 2010: Foehn-like winds and elevated fire danger conditions in Southeastern Australia. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 1067-1095, doi:10.1175/2010JAMC2219.1.
- Smith, R. B., 1990: Why can't stably stratified air rise over high ground? In R. M. Banta, Eds., *Atmospheric processes over Complex Terrain*. Amer. Meteor. Soc., 105-107.
- Stoelinga, M. T., 2009: A users' guide to RIP version 4.6: A program for visualizing mesoscale model output. NCAR on-line document [Available online at https://a.atmos.washington.edu/~ovens/ripug_uw.html].
- Stull, R. B., 1988: *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 670 pp.
- Stull, R., 2017: *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*. University of British Columbia, 940 pp.
- Takahashi, S., 1996: Foehn phenomenon (numerical calculation). *Japan Meteorological Agency Tech. Rep.*, **118**, 179-186 (in Japanese).
- Takane, Y., and H. Kusaka, 2011: Formation mechanisms of the extreme high surface air temperature of 40.9°C observed in the Tokyo metropolitan area: Considerations of dynamic foehn and foehnlike wind. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1827-1841, doi:10.1175/JAMC-D-10-05032.1.
- _____, _____, and H. Kondo, 2015: Investigation of a recent extreme high-temperature event in the Tokyo metropolitan area using numerical simulations: the potential role of a 'hybrid' foehn wind. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **141**, 1857-1869, doi:10.1002/qj.2490.
- Whiteman, C. D., 2000: *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press, 376 pp.
- Xiu, A., and J. E. Pleim, 2001: Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **40**, 192-209.