

지상 및 연직 관측자료 기반 우리나라의 동절기 기후변화 특성분석

정형세*[†] · 최희욱** · 이부용***

*국립기상과학원 기상응용연구부 선임연구원, **국립기상과학원 기상응용연구부 연구사, ***대구가톨릭대학교 환경과학과 교수

Analysis of climate change characteristics in South Korea during winter based on long-term ground and vertical observation

Jeong, Hyeong-Se*[†] · Choi, Hee-Wook** and Lee, Bu-Yong***

*Senior Researcher, Research Applications Department, National Institute Meteorological Sciences, Jeju, Korea

**Research Scientist, Research Applications Department, National Institute Meteorological Sciences, Jeju, Korea

***Professor, Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Daegu, Korea

ABSTRACT

This study analyzed temperature, relative humidity, water vapor pressure, and longwave radiation at specific points using 50 years of ground observations from the Korea Meteorological Administration, 9 years of ground observations from the Korea Forest Service, and 43 years of radiosonde observations. The objective was to determine the effects of climate change at altitude. To achieve this, the trend of each meteorological factor was analyzed based on the annual average, showcasing the distribution across various sites in the ground data and the vertical distribution in the radiosonde observation data. The results indicated increasing trends in various indicators over the 50-year period, including average temperature (1.34°C/50yr), maximum temperature (1.73°C/50yr), minimum temperature (0.47°C/50yr), and diurnal variation (1.26°C/50yr). The temperature trend over 9 years showed an increase in maximum temperature, with Gangwon-do and Gyeongsangnam-do showing the largest increase of 0.15°C/yr or more. Of particular significance was the steep upward trend of maximum temperature in high-altitude mountainous regions compared to nearby flat terrain. This trend in maximum temperature is attributed to the decrease in surface albedo due to reduced snow cover. Additionally, long-term radiosonde observations were utilized to analyze the trend of temperature and long-wave radiation in the upper atmosphere. The findings revealed gradual increases in temperature and long-wave radiation toward the upper atmosphere, suggesting that aerosols and anthropogenic carbon emissions influence long-wave radiation and contribute to the increasing temperatures in the upper atmosphere.

Key words: Vertical Climate Changes, Temperature, Water Vapor Pressure, Long-Wave Radiation, Trend

1. 서론

기후변화는 현재 세계적으로 가장 심각한 문제로 대두되고 있으며, 기후변화의 가장 큰 원인 중 하나는 인간활동으로 인한 온실가스의 배출이다. 온실가스는 산업화에 따른 발전과 함께 에너지의 생산 및 사용, 교통, 산업적인

과정 등에서 나타나는 대량의 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 질소산화물(N₂O) 등으로 정의되며, 배출된 온실가스는 대기에서 장기간 유지되면서 지구복사에 영향을 끼침에 따라 온실효과가 나타나게 된다(Moss et al., 2008; WMO, 2010). 또한, 대규모 산림의 파괴 및 훼손, 도시화로 인한 토지 이용도의 변화 등에 의한 산소 생산 및 이산

[†]Corresponding author : seya1019@naver.com (Research applications department, National Institute Meteorological Sciences, Jeju, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju, Korea. Tel. +82-64-780-6685)

ORCID 정형세 0000-0001-8766-2071
이부용 0000-0003-3514-6694

최희욱 0000-0002-2205-3571

화탄소의 흡수 저하는 지구 온난화를 가속시키는 원인으로 대두되고 있다. 이러한 온실가스의 증가로 인해 지구 온난화는 최근 가속되어 지구의 온도 또한 급진적인 상승을 초래하게 된다(Choi et al., 2008; Hong et al., 2006).

기후변화의 과학적인 원인을 밝혀내고 전지구적인 대응 및 조치를 위해 1988년 설립된 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 기후변화에 대한 전략 개발 및 대응 평가를 위해 매 4년마다 IPCC 보고서를 주기적으로 발표하고 있다. 해당 보고서를 통해 전 지구의 평균기온은 20세기 동안 약 0.85°C 증가하였고(Stocker et al., 2013), 2006년부터 2015년 동안에는 약 0.87°C가 증가함(Masson-Delmotte et al., 2018)을 확인하였다. 이에 따라 지구의 기온은 지난 100년 보다 최근 10년이 더 많은 상승을 보였으며, 지구 온난화로 인한 전 지구적인 기온 상승의 가속화가 진행되고 있음을 나타내었다. 또한 현재의 추세대로라면 지구 평균온도는 2021 ~ 2040년 안에 산업화 이전과 비교해 1.5도 이상으로 높아질 가능성이 큰 것으로 보고되었다(Masson-Delmotte et al., 2021). 우리나라의 경우 관측을 수행한 1912년부터 2020년까지(109년)의 관측자료를 기반으로 과거 30년(1912 ~ 1940년)과 최근의 30년(1991 ~ 2020년)을 비교한 결과, 도시화의 영향을 포함하였을 때 평균기온은 약 1.6°C의 증가폭을 보였다(Korea Meteorological Administration, 2021). 2015년 개최된 제 21차 유엔 기후변화협약 당사국 총회(United Nation Framework Convntion on Climate Change Conference of Parties, COP21)에서는 기후변화의 가속화를 늦추기 위하여 산업화 이전을 기준으로 지구 평균온도의 상승을 2°C보다 상당히 낮은 수준으로 유지하고, 1.5°C로 제한하는 내용의 파리협정(Paris Agreement)을 채택하였다. 해당 협정에는 2023년부터 5년 단위로 전 지구적인 이행점검(Global stocktaking)을 통해 파리협정의 이행 및 장기적인 목표 달성의 가능성을 평가하는 규정이 포함되어 있다. 이 점을 고려한다면 우리나라의 평균온도 상승은 이미 파리협정에서 제시하는 기준에 준하거나 그 이상의 상승을 보임에 따라, 이행점검의 충족을 위해서는 정확한 평균온도의 산정을 바탕으로한 기후변화 적응(Adaptation)과 완화(Mitigation) 정책의 방향 설정이 중요한 시점이다(Masson-Delmotte et al., 2018; The Core Writing Team et al., 2023; UN, 2016).

기후변화에 효과적으로 대응하기 위해서는 장기간 관측자료를 기반으로 기후변화의 진행 척도를 제시하는 과정이 가장 중요하다(Stanhill, 2001). 기후변화 연구는 장

기간 관측된 다양한 기상자료를 기반으로 수행이 되어야 하며, 국외에서는 1800년대 중반부터 다양하게 관측된 기상자료를 기반으로 기후변화로 인해 지구의 기온과 강수량, 해수면 온도 등이 최근 상승 추세(Brohan et al., 2006; Hansen et al., 2001; Lugina et al., 2005; Smith and Reynolds, 2004)를 나타내고, 반면 강설량은 감소하는 추세(Groisman et al., 2005)를 보고하였다. 우리나라의 경우 다수의 연구(Ho et al., 2003; Lee and Kang, 1997; Lee and Kwon, 2004)를 통해 전 지구적인 기후변화 경향을 따르는 것을 확인하였으며, 최근에는 우리나라의 행정구역에 따른 지자체별 기후변화 특성을 분석한 연구(Moon et al., 2020), 특정 지역을 대상으로 기후지수를 적용하여 기후변화의 영향을 분석한 연구(Cho and Choi, 2021), 부산지역을 중심으로 120년간의 관측자료를 활용하여 생활기상지수들을 분석한 연구(Jeon et al., 2023) 등 다양한 관점에서 기후변화를 분석하려는 접근이 시도되고 있다. 우리나라의 관측 기상자료는 1904년부터 항만 도시(인천, 부산, 목포)를 대상으로 생산되고 있으나, 앞서 언급한 기존 연구에서는 특정 기상요소 및 낮은 고도에 위치한 관측지점들을 중심으로 수행됨으로 인해 우리나라를 대표하는 기후변화의 경향을 파악하기에 어려움이 있다.

우리나라는 삼면이 바다로 구성된 입지에 약 70%가 산악지점으로 이루어져 있으며(NGII, 2008), 기상요소는 지리적 위치와 지형, 주변 환경에 따라 변화의 폭 및 발달하는 경향이 달라지는 특성을 가지고 있다. 따라서 보다 상세하게 기후변화에 대해 분석하기 위해서는 단순한 지점측의 2차원적인 분석 뿐만 아닌 3차원적인 연직 관점에서의 연구가 필요로 한다. 본 연구에서는 기후변화에 가장 민감하게 반응하는 계절인 동절기를 대상으로 평균기온, 최고기온, 최저기온, 일교차, 그리고 상대습도, 포화수증기압, 장파복사 등의 기상요소를 활용하여 지상과 대기상층의 기후변화 특성에 대해 분석하고자 한다.

2. 자료 및 방법

기후변화 특성을 분석하기 위해서 장기간의 관측자료가 필요로 하며, 해당 자료를 얻기 위하여 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서 운영 중인 기상자료개방포털(www.data.go.kr)을 활용하였다. 해당 홈페이지에서는 기상청의 관측자료 이외에도 각 기관의 목적에 따라 수집된 기상 관측자료가 제공되고 있다. 분석을 위해 사용된 자료는 기상청의 지상과 라디오존데

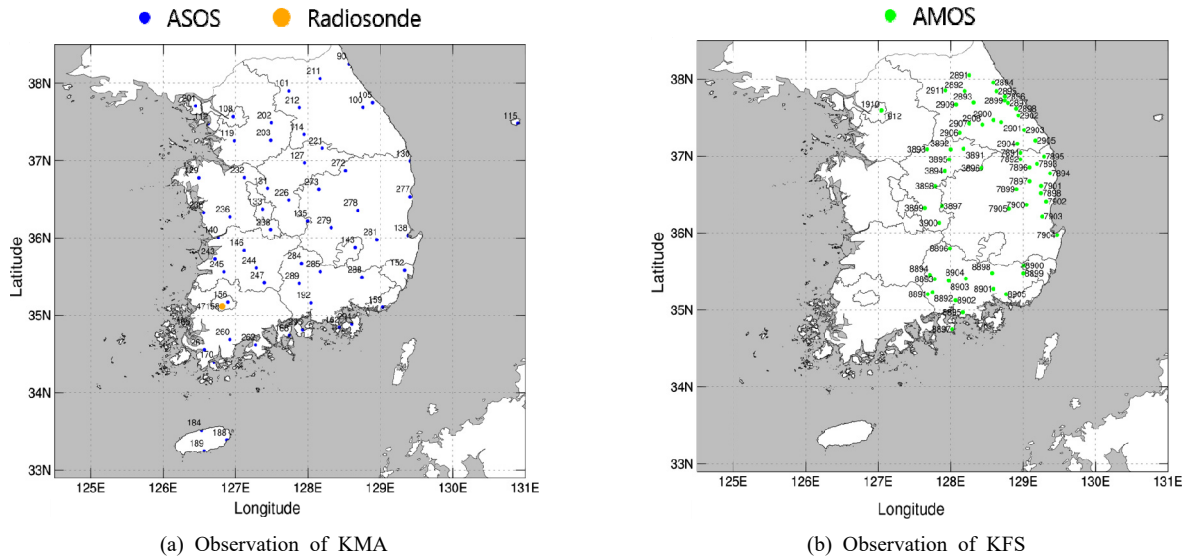


Fig. 1. Location of observation site

(Radiosonde) 관측자료, 산림청의 산악 관측자료로 구성하였다. 기상청에서는 관측자료의 안정적인 생산 및 높은 신뢰성 확보를 목적으로 1973년부터 현대적인 관측장비를 활용하여 구축된 60지점의 중관기상관측소(Automated Synoptic Observation System, ASOS)를 구축하였고, 본 연구에서는 해당 60지점의 관측자료에 대해 관측이 시작된 1973년 부터 2022년(50년)까지의 자료를 대상으로 자료를 구성하였다(Fig. 1a). 산림청의 산악 관측자료는 산림청(Korea Forest Service, KFS)에서 2014년부터 구축한 산악기상관측망(Automatic Mountain Meteorology Observation System, AMOS) 61지점을 구축함에 따라, 산악 관측자료는 해당 61지점에서 생산된 2014년 부터 2022년까지(9년)의 관측자료로 구성하였다(Fig. 1b, Table S1). 그리고 라디오존데 관측자료는 ASOS 지점과 인접하면서 1978년부터 안정적인 관측을 수행 중인 광주 지점을 대상으로, 라디오존데 관측을 수행한 시간 중 가장 많은 데이터를 보유한 시간대인 9시 KST (00 UTC)의 관측자료를 활용하였다. 또한, 라디오존데 관측자료의 연직 기압 범위는 결측 등을 고려하여 1,000 ~ 400 hPa로 설정하였다. 분석에 활용된 자료는 일괄적으로 동절기에 해당하는 월(12, 1, 2 월)을 대상으로 일 자료로 변환하여 연구에 활용하였다.

기상요소 중 상대습도는 간단하고 쉬운 비열에 기반한 수치로 표기됨에 따라 습도와 관련 연구에서 일반적으로 사용되나 기온의 변화에 따라 영향을 받는 특성으로 인하여 비교를 위해 절대적인 수증기량을 의미하는 수증기압

으로도 사용한다(Choi et al, 2014). 본 연구에서는 연도에서 다른 습도의 변화를 파악하기 위해 상대습도와 함께 포화수증기압도 분석을 수행하였다.

포화수증기압은 식 (1)과 같이 Tetens's Formula 수식을 통해 산출이 가능하다.

$$e_s(T) = 6.11 \times 10^{7.5T/(T+273.3)} \quad (1)$$

여기서, $e_s(T)$ 는 섭씨 온도에서의 포화수증기압을 뜻하고, T 는 섭씨 온도(°C)이다.

라디오존데 관측자료에서는 상대습도를 관측하고 있지 않으나 이슬점 온도(Dew point temperature)를 관측하고 있으므로, 이슬점 온도를 활용한 상대습도의 계산이 가능하다. 상대습도는 포화수증기압에 대한 실제 수증기압의 비로 정의되며, 식 (2)와 같이 정의가 가능하다. 실제 수증기압은 식 (3)을 활용하여 계산할 수 있다.

$$RH = e/e_s \times 100\% \quad (2)$$

$$e(T_d) = 6.11 \times 10^{7.5T_d/(T_d+273.3)} \quad (3)$$

여기서, RH 는 상대습도(%), e 는 실제 수증기압(hPa), e_s 는 포화수증기압(hPa)을 뜻하며, $e(T_d)$ 는 이슬점 온도에서의 실제수증기압이며, T_d 는 이슬점 온도이다.

장파복사(Long-wave radiation, L)는 지구 대기나 지표

면으로 들어온 태양복사가 특정 물질에 의해 변화하는 복사 에너지를 일컫으며 기온과 밀접한 관계를 지닌다(Choi et al, 2015). 본 연구에서는 장파복사의 추정을 위해 Kondo (1976)와 Kondo and Miura (1985)에서 제안한 식 (4)를 적용하였다.

$$L/\sigma T^4 = 1 - (0.49 - 0.066e^{1/2})(1 - nCh) \quad (4)$$

여기서, C와 h는 식 (5)와 식 (6)으로 주어진다.

$$C = 0.75 - 0.005e \quad (5)$$

$$h = \frac{(n_1 + 0.85n_2 + 0.5n_3)}{n} + 0.1(N_r/N) \quad (6)$$

여기서, e는 일평균 수증기압을 나타내며, 먼저 제시한 식 (1)을 적용하였다. 또한, h는 구름의 높이를 나타내는 매개변수를 나타내며, n, n₁, n₂, n₃은 각각 전운량, 하층, 중층, 그리고 상층운량이며, N_r/N은 하루 중 강수의 지속된 시간을 뜻한다. 중층운(n₂)과 상층운(n₃)은 관측자료의 부족으로 인해, Ishi and Kondo (1993)가 제안한 아래와 같이 근사관계를 적용하였다.

$$n_2 = n_3 = (n - n_1)/2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} N_r/N &= 0 \text{ for } n_1 < 1 \\ &= 0.5 \text{ for } n_1 = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

연직의 장파복사 분석에는 식 (7)과 같이 운량 자료를 필요로 하며, 이를 위해 운량자료가 생산되는 광주 지점을 대상을 분석을 수행하였다. 또한, 장파복사 추정에는 연직의 기온 이외에도 연직의 이슬점 온도와 지표의 총운량, 중저층 운량이 필요로 한다. 따라서 장파복사 분석은 해당 관측자료를 안정적인 생산을 나타내는 1991년부터 2022년까지에 대해 식 (4)를 적용하였다.

본 연구에서는 50년간 지상 기온의 변화 분석, 지점별 기상요소 변화 분석과 산악지형을 포함한 지점별 기상요소 변화 분석, 그리고 광주지역 대기 상층의 기상요소 변화 분석에 따른 추세 변화 분석을 통해 우리나라의 지상과 연직에 따른 기후변화 특성을 규명하고자 하였다.

3. 결과

3.1. 50년간 지상 기온의 변화분석

연도에 따른 우리나라의 전반적인 기온 변동을 확인하기 위해 50년간 기상청 ASOS 60지점의 평균을 활용하여 동절기의 연평균 기온, 연평균 최고기온, 연평균 최저기온, 그리고 연평균 일교차를 Fig. 2에 나타내었다. 각 기상

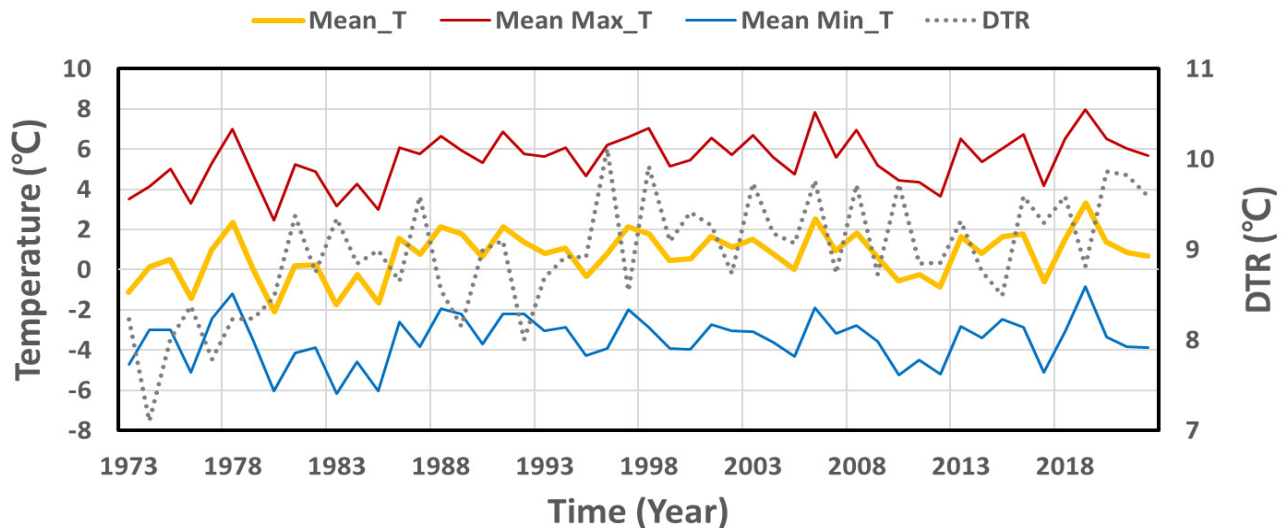


Fig. 2. Average annual temperature (Orange line), annual average maximum temperature (Red line), annual average minimum temperature (Blue line), and annual average diurnal temperature range (Gray dotted line) of 60 observation sites of the KMA for 50 years (The year refers to winter (Dec–Jan) season)

Table 1. Statistical table by meteorological factor in winter at 10-year intervals

	T _{mean} (°C)	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	DTR (°C)	RH (%)
1973 ~ 1982	0.01	4.57	-3.64	8.21	67.32
1983 ~ 1992	0.62	5.23	-3.64	8.87	66.90
1993 ~ 2002	1.01	5.91	-3.20	9.11	62.77
2003 ~ 2012	0.73	5.56	-3.66	9.22	61.02
2013 ~ 2022	1.17	5.99	-3.26	9.25	60.98

*T_{mean} : mean temperature, T_{max} : max temperature, T_{min} : min temperature, DTR: Diurnal temperature range, RH: Relative humidity

요소별 변동 경향은 일교차를 제외한 나머지 모두 유사한 형태를 보이며, 그 변동폭은 평균기온(5.39°C), 최고기온(5.53°C), 최저기온(5.33°C)이 일정한 값을 나타냈다. 기온은 온난화의 영향을 직접적으로 받는 기상요소이기 때문에 지난 50년간 평균기온(1.34°C/50 yr), 최고기온(1.73°C/50 yr), 최저기온(0.47°C/50 yr), 일교차(1.26°C/50 yr)는 모두 증가하는 추세를 보였다. 특히, 최고기온은 최저기온의 약 3.7배에 달하는 증가를 보였으며, 해당 경향은 일교차에 영향을 주어 일교차의 증가 추세를 나타낸다. 통계적인 유의성의 경우 평균기온(0.018), 최고기온(0.003), 일교차(0.000)의 p-value는 유의수준 0.05 이하를 나타내어 유의수준을 만족하였으나, 최저기온(0.428)은 p-value가 0.05 이상의 값을 나타내어 유의수준을 만족하지 못하는 결과를 보였다.

Table 1은 10년 간격의 기상요소별 통계를 나타내고 있다. 먼저, 평균기온은 관측이 시작된 1973 ~ 1982년이 가장 낮은 기온인 0.01°C를 나타내었고, 이후로는 약 0.62°C에서 1.17°C의 범위에 분포하고 있다. 평균 최고기온은 평균 기온과 유사한 추세를 보이고 있으나, 평균 최저기온은 -3.20 ~ -3.66°C로 앞서 분석된 내용과 달리 소수점 첫 번째 자리 정도에서 변동하는 경향을 보였다. 이에 따라 일교차는 적은 변동을 나타내는 최저기온과 큰 증가 추세를 나타내는 최고기온으로 인하여 지속적으로 증가하는 추세를 보이게 되었다. 전지구적인 기온의 변동은 연도에 따라 엘니뇨·라니냐의 변화에 따른 기후의 변동은 존재하나(Lau and Weng, 1999; Trenberth, 1999), 우리나라의 기온은 전지구적인 기후 변동에도 불구하고 지속적으로 증가하는 추세를 보인다. 또한 상대습도는 관측을 시작한 이후 약 67.32%를 시작으로 1992년부터 급격하게 낮아져, 최근에는 약 60.98%의 값을 보였다.

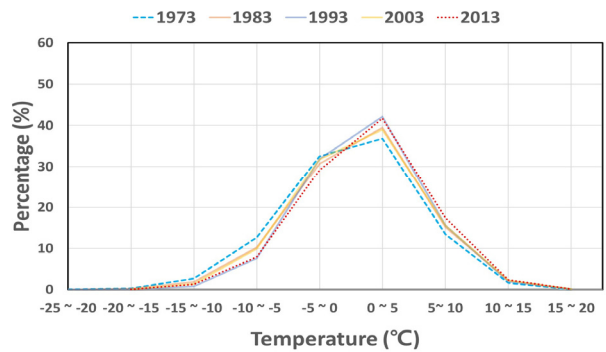


Fig. 3. Percentage of average daily temperature in winter over 10-year intervals based on KMA ASOS

Fig. 3은 KMA의 ASOS를 활용하여 -25 ~ 20°C을 5°C 간격으로 나타낸 10년 간격별 일 평균기온의 비율 분포이다. 일 평균기온은 모든 연도가 -25°C에서 20°C 구간에 분포하며, -20°C 이하의 구간은 1973 ~ 1982년도에서만 나타났다. 모든 연도에서 가장 많은 비율을 나타낸 기온 구간은 0 ~ 5°C 구간이며, 해당 비율은 꾸준히 늘어나는 경향을 보였다. 이에 따른 영하 기온의 비율은 Table 1에서 연도 구간 중 가장 낮은 평균 기온을 나타낸 1973년 ~ 1982년 구간에서 48.14%를 보였으나, 이후 비율이 점차 감소하는 40.28 ~ 43.26%의 범위를 보이다가, 최근인 2013년 ~ 2022년 구간에는 가장 작은 38.49%의 비율을 보인다. 반면, 영상 기온의 비율은 1973년 ~ 1982년 구간에서 약 51.86%을 시작으로 연도의 구간에 따라 상승 추세를 나타내었다. Jung (2002)은 우리나라의 기온을 대상으로 Wavelet 분석을 수행하였고, 동절기에 나타나는 1980년대 중반을 전후한 급격한 변화 양상에 대해 보고하였다. 즉, 한반도의 평균기온은 1980년대를 변화시점으로 하여 지속적으로 증가하고 있는 경향을 보이며, 이는 산업화에 기인한 기후변화의 영향으로 판단된다.

3.2. 지점별 기상요소 변화분석

Fig. 4에서는 기상청에서 관측된 50년간 60개 지점별 기온 관측자료를 활용하여 평균기온, 평균 최저기온, 평균 최고기온, 평균 일교차의 추세 분포를 나타내었다. 기온은 지리적인 특성에 영향을 받음에 따라 지점에 따라 다른 분포를 보였다. 평균기온(Fig. 4a)은 지역에 따라 0.003 ~ 0.070°C/yr 정도의 변동성을 보이며, 모든 지점에서 증가하는 추세를 보였다. 최고기온은 목포를 제외한 모든 지점에서 평균기온과 같이 0.015 ~ 0.056°C/yr의 변동성으

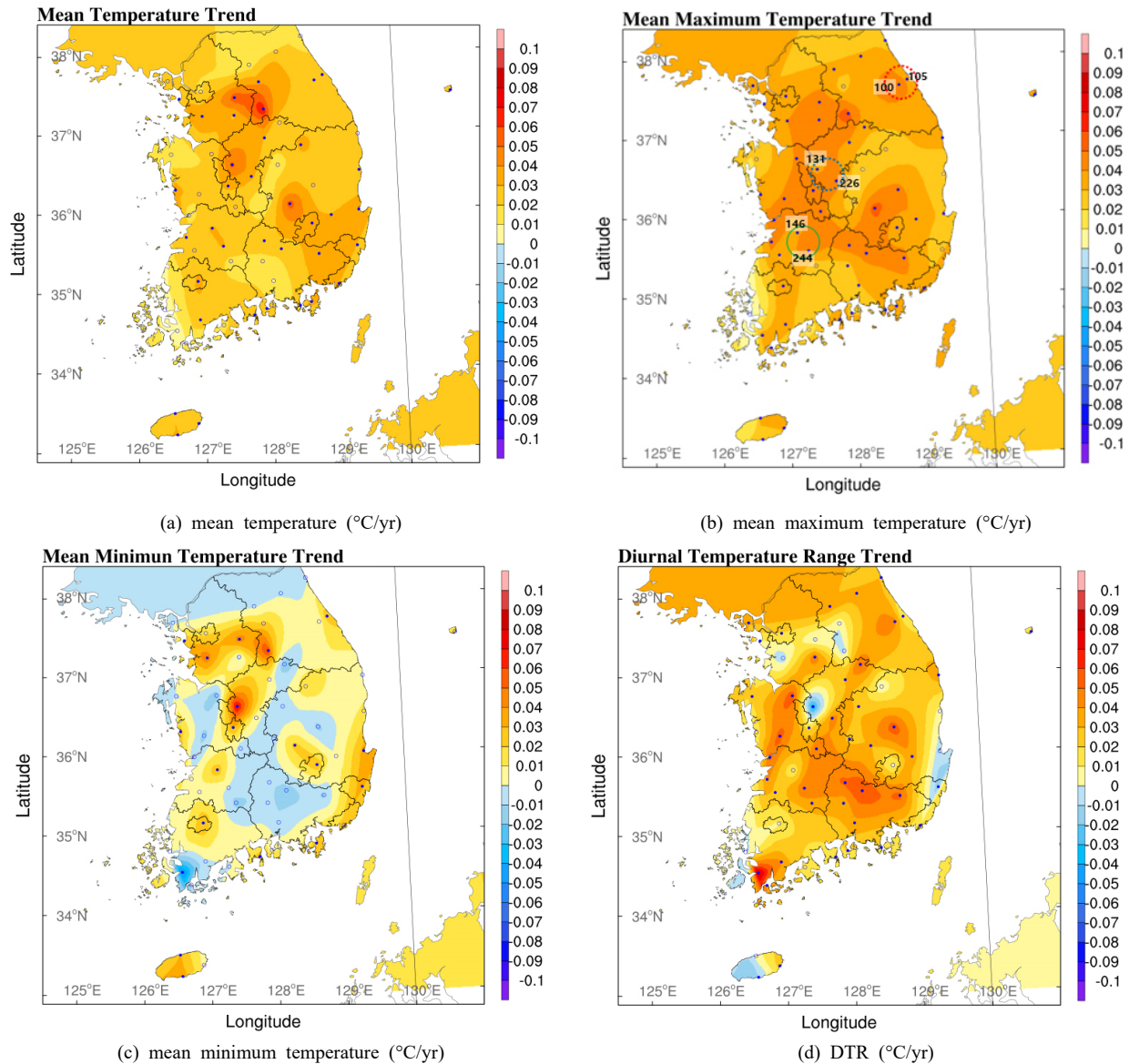


Fig. 4. Spatial distribution of Temperature related trends at each sites according to KMA ASOS over 50 years of winter

로 증가 추세를 보였으며, 목포 지점(-0.005°C/yr)은 관측 지점이 바다와 약 600 m로 인접하게 위치함에 따라 바다로 인한 비열용량이 지속적으로 영향을 끼쳐 약간의 감소 추세를 보이는 것으로 사료된다. 또한 최고기온(Fig. 4b)의 경우 대관령(100)과 강릉(105), 보은(226)와 청주(131), 임실(244)과 전주(146)에서는 100 m 이상 산악지역의 기온 증가 추세가 인근의 평지지역 보다 더 높은 현상을 확인하였으며, 이러한 현상은 특정 지역에 국한되지 않고

전국적으로 분포하고 있다. 고도에 따른 최고기온 추세의 경우 대관령(842 m)과 강릉(27 m)은 각각 0.047°C/yr와 0.038°C/yr로 나타났으며, 보은(171 m)과 청주(59 m)는 각각 0.046°C/yr와 0.038°C/yr, 임실(247 m)과 전주(60 m)는 각각 0.050°C/yr와 0.038°C/yr으로 나타났다. 이는 산악지형 또는 높은 고도에 위치한 관측지점이 낮은 평지에 위치한 관측지점 대비 약 0.010°C/yr가 더 높은 추세로 상승한 것을 의미하며, 이를 지난 50년간 상승한 기온으로 환산 시

Table 2. Top 5 sites of decrease and increase trend for DTR among the KMA ASOS over 50 years of winter (60 sites)

Trend	Station (Number)	Trend (°C/yr)		
		DTR	T_max	T_min
Decrease	Cheongju (131)	-0.038	0.038	0.076
	Ulsan (152)	-0.015	0.021	0.036
	Seogwipo (189)	-0.013	0.022	0.035
	Suwon (119)	-0.008	0.040	0.048
	Wonju (114)	-0.007	0.056	0.063
Increase	Buyeo (236)	0.055	0.041	-0.014
	Cheonan (232)	0.057	0.041	-0.016
	Uiseong (278)	0.057	0.044	-0.013
	Hapcheon (285)	0.061	0.045	-0.016
	Haenam (295)	0.088	0.035	-0.053

* DTR: Diurnal temperature range, T_max : maximum temperature, T_min : minimum temperature

약 0.5°C/ 50 yr 정도이다. 특히, 산악지형 및 높은 고도의 관측지점에서 나타난 최고기온의 증가 추세는 대도시에서 평균적으로 나타난 최고기온의 추세인 약 0.04°C/yr 보다 높은 추세를 보였다. 평균 최저기온(Fig. 4c)의 추세 분포는 해안과 도시 지역에서 증가 추세를 나타내며, 이는 각각 바다의 열용량과 도시지역의 인공열과 관계가 있다(Choi et al, 2014). 이 외의 내륙지역에서는 감소 추세를 보였다.

일교차(Fig. 4d)의 추세 분포는 -0.038 ~ 0.088°C/yr의 범위를 보이며, 대부분의 관측지점에서 일교차의 추세가 양의 추세를 나타내며 증가하였다. 일교차의 증가 및 감소에 따른 상위 5개 지점에 대한 일교차, 최고기온, 최저기온 추세를 살펴보면, 일교차의 감소 추세가 나타나는 지점에서는 최저기온의 높은 증가 추세가 나타났고, 일교차의 증가 추세를 보이는 지점에서는 최고기온의 증가 추세가 두드러졌다(Table 2). 일교차의 경우 국지적으로는 도시화 수준, 수변 시설, 사막화 및 지역 토지 이용의 변화율, 기후적으로는 운량의 증가, 지표면의 증발, 온실가스 및 대류권 에어로졸 등의 영향(Henderson-Sellers, 1992; Karl et al., 1993)으로 인해 태양복사에 영향을 준다(Zhang et al., 2016). 즉, 일교차는 국지적인 요소와 기후적인 요소로 인해 나타나는 최고기온과 최저기온의 변동에 따라 달라지는 특성이 있다.

Fig. 5는 기상청에서 관측된 50년간 60개 지점별 상대습도와 포화수증기압의 추세 분포이다. 상대습도의 추세 분포(Fig. 5a)의 경우 해안지역을 제외한 모든 내륙지역에서는 상대적인 차이가 있으나, 상대습도 추세가 감소하여 건조해지는 경향을 보인다. 특히, 광역시급 이상의 대도시와 충청도, 그리고 대구를 중심으로 하는 경상도 지역에서는 -0.18%/yr 이하의 감소 추세를 보였으며, 그중 청주

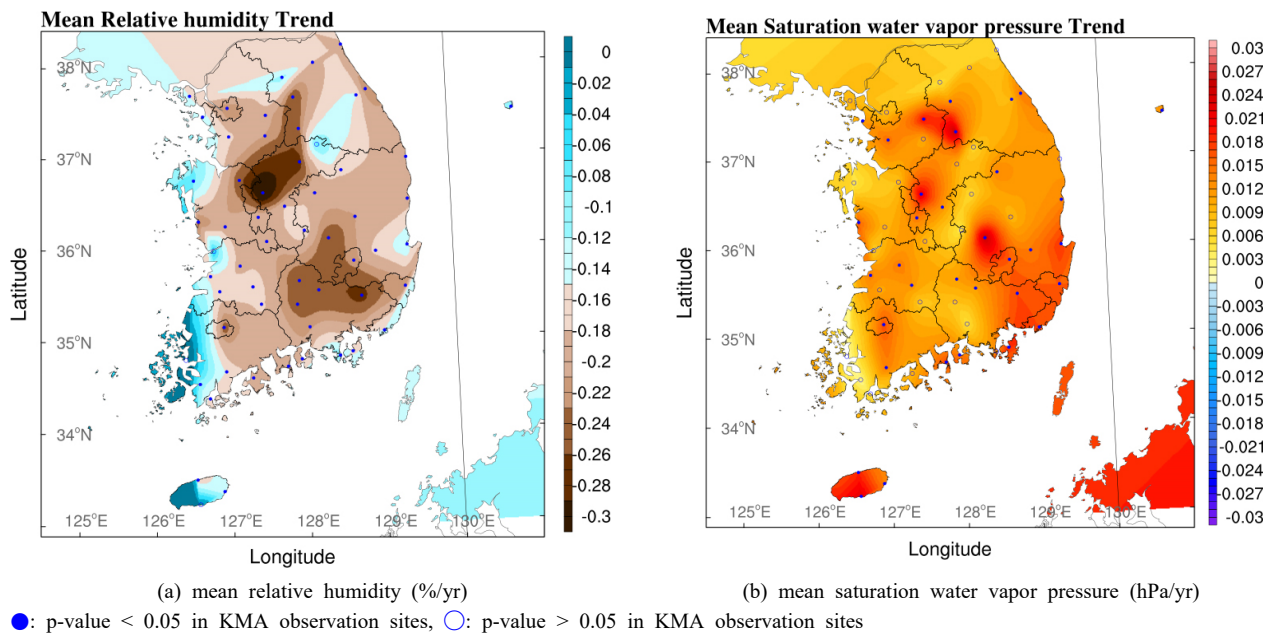


Fig. 5. Spatial distribution of relative humidity and water vapor trends at each sites according to KMA ASOS over 50 years of winter

와 증주는 각각 $-0.35\%/yr$ 와 $-0.29\%/yr$ 로 전국 중에서 가장 낮은 추세를 나타내었다. 포화수증기압(Fig. 5b)의 추세 분포는 $0 \sim 0.023 \text{ hPa/yr}$ 정도에 분포하고 있으며, 모든 지점에서 증가 추세를 나타내었다. 포화수증기압의 추세는 상대습도의 분포와 반비례하는 경향을 보인다. 상대습도는 대기 중에 수증기의 정도를 나타내는 실제 수증기압과 기온에 대한 포화수증기압의 비로 정의된다. 따라서

포화수증기압은 기온의 증가에 따라 민감하게 영향을 받으며, 기후변화로 인한 기온의 증가는 수증기압의 증가로 이어지고, 수증기압의 증가는 상대습도의 저하로 나타나는 것이다. 또한, 대도시에서는 도시 개발로 인한 수변·녹지 등 증발원의 감소가 증발산량의 감소에 영향을 주므로, 이는 대기 중 수증기량의 감소로 이어지게 되어 상대습도의 감소를 야기한다(Park and Kim, 2007).

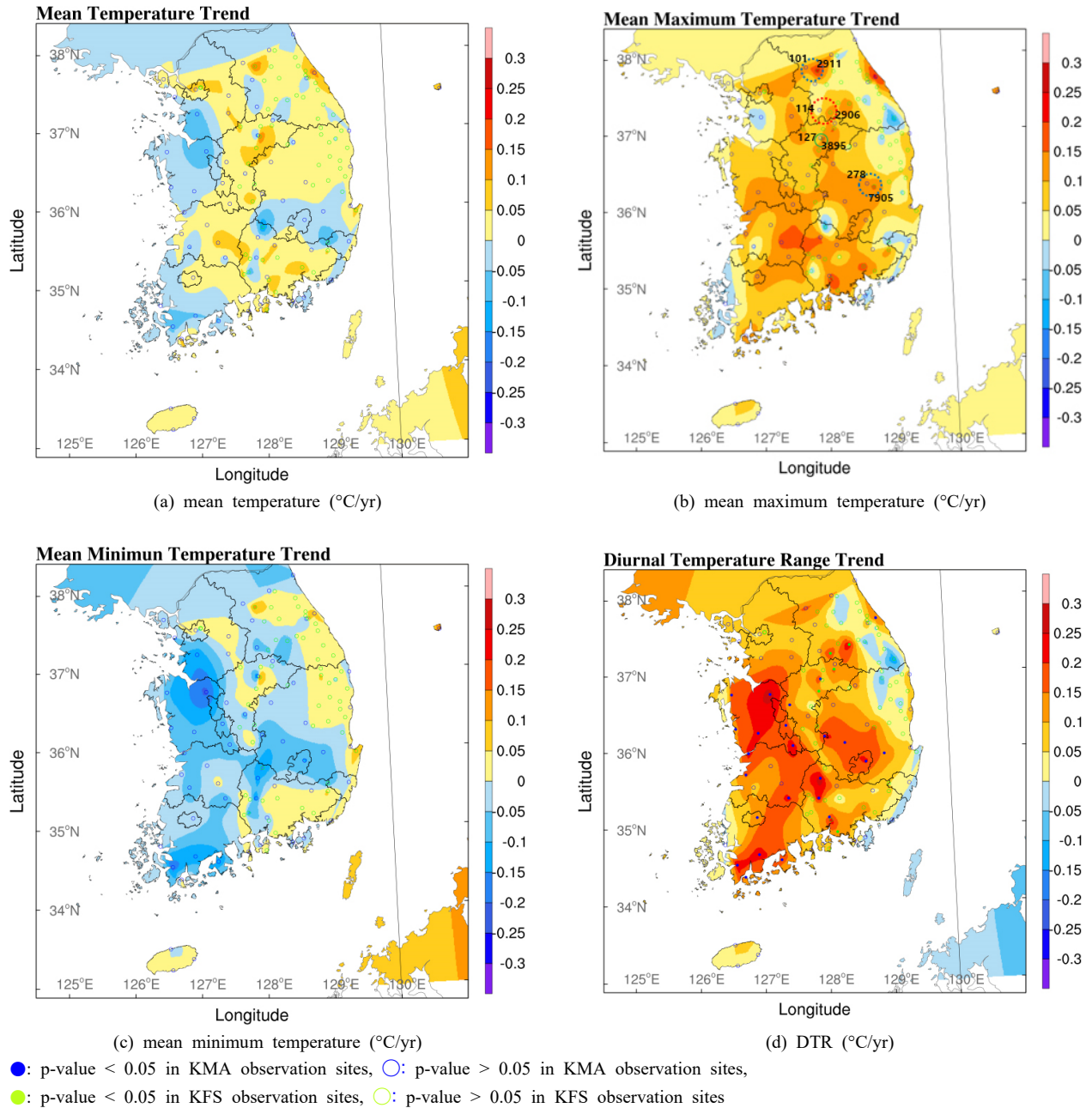


Fig. 6. Same as Fig 4, but for KMA ASOS and KFS AMOS (9 years)

3.3. 산악지형을 포함한 지점별 기상요소의 변화분석

Fig. 6은 고도에 따른 기온의 변동성을 보다 상세하게 분석하기 위하여 9년간 관측된 산림청 AMOS 61지점과 기상청 ASOS 60지점의 평균기온, 평균 최고기온, 평균 최저기온, 평균 일교차 추세 분포를 나타내었다. 먼저, Fig. 6 (-0.3 ~ 0.3°C/yr)는 Fig. 4 (-0.1 ~ 0.1°C/yr) 대비 짧은 기간임에도 불구하고 분포의 범위가 더 큰 값을 나타내었으며, 이는 우리나라의 기후변화 경향이 최근으로 올수록 가속화되고 있다는 점을 시사한다(Masson-Delmotte et al., 2018). 평균기온(Fig. 6a)의 추세 분포는 -0.163 ~ 0.158°C/yr의 범위에 분포하며, 전국적으로 증가 추세를 보이던 Fig. 4a와는 달리 평균기온의 감소 추세가 충청남도과 경상북도 하부, 그리고 전라남도에서 나타났으며, 광역시급 중에서는 대구가 유일하게 -0.026°C/yr으로 감소하였다. 최고기온(Fig. 6b)의 경우 범위는 -0.144 ~ 0.230°C/yr을 보이며, 일부 감소 추세를 보이지만, 강원도와 경상남도에서는 0.15°C/yr 이상의 강한 증가 추세를 나타내었다. 또한 가리산(2911)과 춘천(101), 배향산(2906)과 원주(114), 남산(3895)과 충주(127), 주월산(7905)과 의성(278)은 20 km 이하의 인접한 위치에 있으나, 고도에 따라 최고기온의 추세가 적게는 약 0.054°C/yr, 많게는 약 0.125°C/yr의 차이를 보이는 특징이 있었다. 최저기온의 추세 분포(Fig. 6c)는 -0.216 ~ 0.127°C/yr의 범위에 분포하며, 산악지형의 중심이 되는 태백산맥 주변, 서울 인근, 경상남도 그리고 섬 등의 일부 지점에서는 최저기온이 상승하는 추세를 보였으나, 이외의 지역에서는 전반적으로 최저기온의 감소 추세가 뚜렷하게 나타났다. 일교차의 추세 분포(Fig. 6d)는 -0.158 ~ 0.285의 범위이며, 일부 해안가 및 태백산맥을 제외한 지역에서는 대체로 일교차의 증가 추세가 두드러졌다. 특히, 산악지형에서는 최고기온과 최저기온의 증가 추세로 인해 일교차가 감소하거나 유지되는 추세를 보였다.

며, 평지 지형에서는 전반적으로 최고기온 증가 추세와 최저기온 감소 추세로 인하여 일교차의 증가 추세를 보였다.

Table 3은 산림청의 AMOS 자료를 활용하여 -25 ~ 15°C를 5°C 간격으로 나타낸 연간 일 최저기온의 비율을 나타낸다. 일 최저기온의 비율은 연도에 따라 다른 경향의 비율 범위를 보이지만 대체로 영하의 기온에서 70%이상의 높은 비율을 보였다. 가장 높은 비율을 차지하는 구간의 경우 2014년부터 2018년까지는 -10 ~ -5°C 구간이었으나, 2021년을 제외한 2019년 부터는 -5 ~ 0°C 구간에서 가장 높은 비율을 나타내었다. 이에 따라 영하의 기온에서의 비율은 매년 0.6% 가량 감소하는 추이를 보였다.

Fig. 7은 기상청과 산림청의 9년간 관측 자료를 활용하여 상대습도와 포화수증기압의 지점별 추세를 나타내었다. 상대습도 추세(Fig. 7a)는 범위가 -2.25 ~ 1.05%에 분포하며, 전반적으로 경기도 일부를 제외하고는 앞서 분석된 Fig. 5a와 같이 감소 추세를 유지하는 경향이며, 특히 산림청 자료의 대부분이 분포한 태백산맥의 산악지형은 전국적인 평균 상대습도의 감소 추세 중 가장 높은 감소 추세를 나타내었다. 포화수증기압(Fig. 7b)은 범위가 -0.051 ~ 0.080 hPa 정도에 분포하고 있으며, 경상도 중심과 경기도 하부, 그리고 전라도 하부지역에서 나타나는 약한 감소 추세를 제외한다면 포화수증기압은 전국적으로 강한 증가 추세를 보였다. 이를 통해 최근의 9년 동안 태백산맥을 따라 나타나는 산악지형에서는 포화수증기압 증가가 상대습도의 감소에 영향을 끼친 것으로 판단된다.

산악지형에서의 기후변화는 운량(Rangwala et al., 2009), 수증기 및 복사 플럭스(Ohmura, 1984; Rangwala et al., 2009), 에어로졸(Ramanathan and Carmichael, 2008; Vernier et al., 2011), 그리고 지표면 반사율의 영향을 받으며, 또한 자연적으로 발생하는 지표면 반사율의 변동은 동절기의 적설에 의한 알베도 변화(Rangwala et al., 2010)가 가장 큰 요소 중 하나이다. 즉, 산악 지형은 평지 지형

Table 3. Percentage of annual daily minimum temperature based on KFS AMOS

		(Unit: %)									
		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
-30	~ -25	0.00	0.16	0.00	0.29	0.00	0.00	0.23	0.00	0.28	
-25	~ -20	0.58	1.43	0.17	3.03	0.35	0.02	2.20	0.88	1.55	
-20	~ -15	4.50	3.58	3.03	11.08	3.24	1.14	8.82	7.41	5.73	
-15	~ -10	18.34	15.63	15.67	22.00	15.49	8.43	18.46	19.57	16.67	
-10	~ -5	37.43	31.78	33.90	31.61	34.78	25.86	24.39	32.46	32.10	
-5	~ 0	33.00	31.38	32.93	25.76	31.67	39.28	27.50	27.20	33.28	
0	~ 5	6.00	13.18	12.64	6.18	12.32	22.41	15.63	11.50	9.16	
5	~ 10	0.00	2.73	1.66	0.05	1.77	2.84	2.71	0.98	1.14	
10	~ 15	0.15	0.13	0.00	0.00	0.38	0.02	0.06	0.00	0.09	

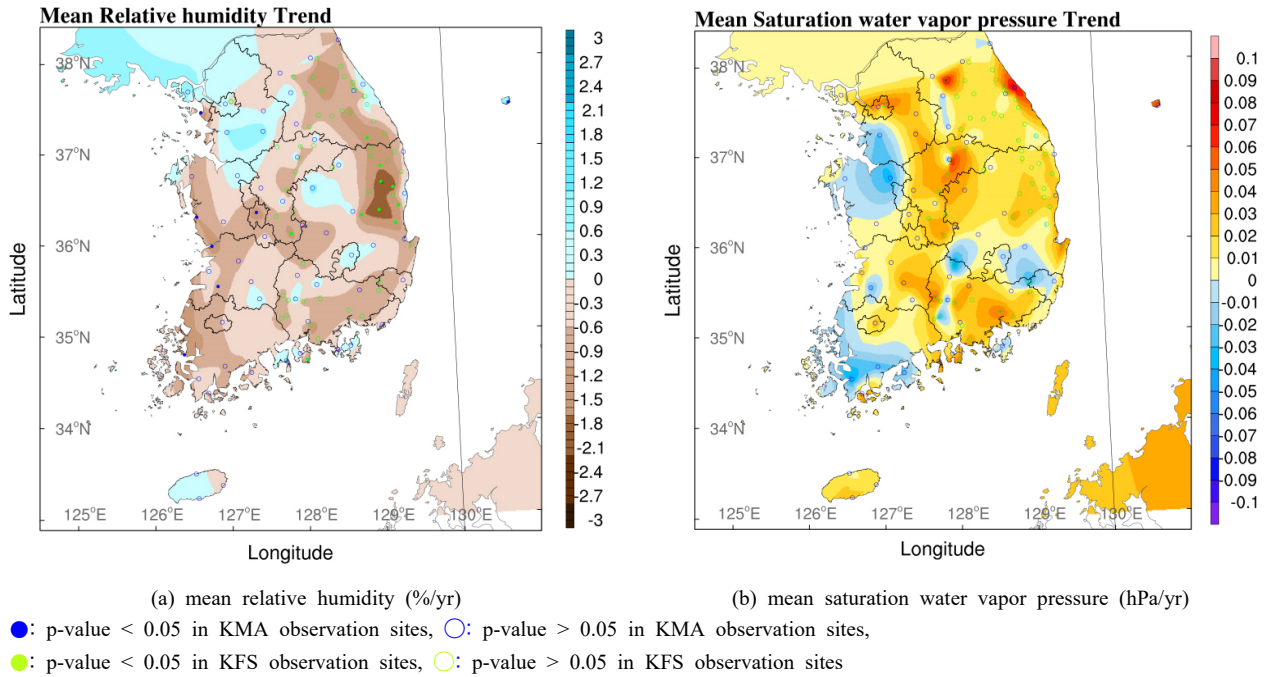


Fig. 7. Same as Fig 5, but for KMA ASOS and KFS AMOS (9 years)

대비 높은 고도로 인하여 낮은 기온이 유지되나, Table 3에서 분석된 바와 같이 기후변화로 인해 최저기온이 지속적으로 상승함에 따라 산악지형의 적설이 지속적으로 감소하게 되며, 이에 따라 지표면 알베도는 저하하게 된다. 지표면 알베도의 저하는 지표 복사 플럭스 효과의 증대로 이어지므로, 최종적으로는 산악 지형의 기온 증가로 나타난다. 따라서 산악 지형은 평지 지형 대비 더 높은 최고기온의 증가 추세를 보이게 된다. 적설은 존재 유무에 따라 약 2°C/50yr 정도의 통계적인 차이가 있으며(Scherrer et al., 2012), 화석 연료로 인해 생성되는 검댕(Black carbon, BC)과 같은 불순물이 적설 내 존재할 때도 적설의 알베도가 감소함에 따라 기온의 증가를 야기한다(Conway et al., 1996; Warren and Wiscombe, 1980).

3.4. 광주지역 대기 상층의 기상요소 변화분석

대기 상층의 장기간 기온변화를 분석하기 위하여 라디오존데 관측자료를 활용하였다. Fig. 8은 장기간 연직의 기온변화를 확인하기 위하여 광주의 지표와 라디오존데 자료의 45년간 연평균 기온 아노말리(Anomaly)를 나타낸다. 라디오존데의 850 hPa와 500 hPa 기압면에서의 해발 고도는 각각 1.5 km와 5.0 km 정도로, 대기 중에서 낮은 층과 대기 중간층으로 여겨지며, 대기운동을 분석하거나

예측 시 중요한 기압면 중 하나이다. 연직의 기온에 대한 변동성을 제거한 아노말리는 연직간의 거리에도 불구하고 상당히 유사한 연간 변화 패턴을 나타내며, 1979년부터 1985년까지는 -3.88 ~ -0.23°C의 범위에서 지속적인 음의 아노말리를 나타내는 경향을 보이다가, 이후로는 전반적으로 -1°C 이상의 아노말리를 나타내고 있으며, 최근으로 올수록 아노말리의 변동범위가 양의 값을 나타내며 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다. 이에 따른 연직간 기온의 추세는 대도시로 분류되는 광주의 지표 기온 추세(0.0262°C/yr) 보다 상층에 위치한 850 hPa (0.0310°C/yr) 과 500 hPa (0.0349°C/yr)에서 더 높은 값을 나타내며, 고도와 비례한 연직간 뚜렷한 기온의 증가 추세를 보였다.

Fig. 9는 광주 지점에서 동절기의 1,000 ~ 400 hPa 기압면에 대한 평균기온과 장파복사의 추세를 나타낸다. 먼저, 연직 평균기온 추세(Fig. 9a)의 경우 Fig. 8과 같이 1978 ~ 2022년에는 고도가 증가함에 따라 기온의 추세 또한 증가 추세를 보였으며, 특히 500 hPa 이후로는 약 0.04°C/yr 이상의 상승 경향을 보였다. 1991 ~ 2022년은 1,000 ~ 850 hPa에서 감소 추세를 보였으나, 850 hPa 이상의 대기 상층에서는 고도가 올라감에 따라 증가하는 추세를 나타내었다. 이에 따른 700 hPa 이상의 평균기온 변화폭은 0.017 ~ 0.050°C로 나타났다. 또한, 700 hPa 이하의 경우 1978

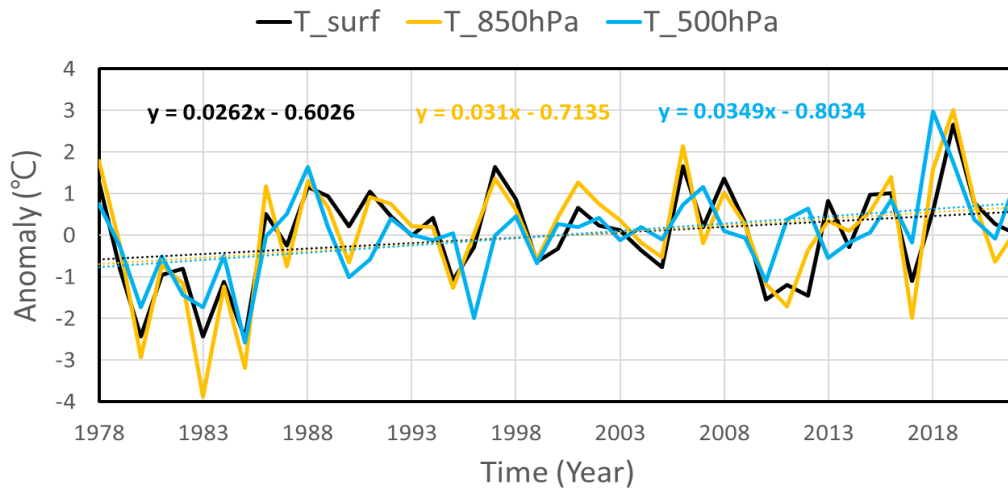


Fig. 8. Anomaly time series of average annual temperature according to the ASOS (Black line), 850 hPa (Orange line) and 500 hpa (Blue line) in winter of Gwangju area

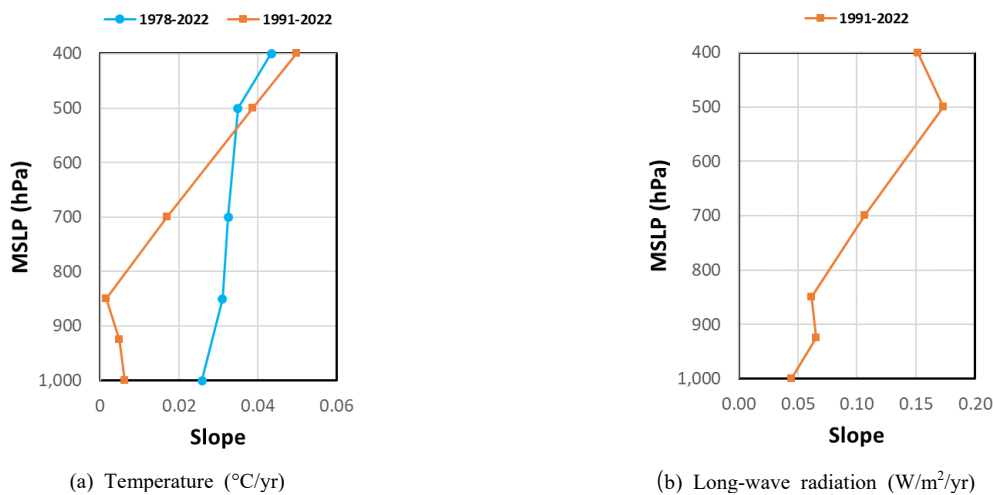


Fig. 9. Trends of temperature and long-wave radiation according to vertical pressure in winter of Gwangju area (Blue line: 1978~2022, Orange line: 1991~2022)

~ 2022년과 1991 ~ 2022년이 다른 경향을 나타내는데, 이는 Fig. 8의 시계열에서 보이는 바와 같이 1980년대에 이루어진 도시화 및 산업화로 인해 생성된 기온역전층과 스모그의 영향으로 판단된다. 연직 장파복사 추세(Fig. 9b)의 범위는 0.05 ~ 0.17 W/m²/yr을 보였으며, 850 ~ 500 hPa를 제외한 장파복사의 연직 변화 경향은 평균기온의 연직 변화 경향과 유사하였다. 즉, 연직 기온의 상승은 장파복사의 상승에 기인한 결과로 분석되었다. 기온은 다양한 기상요소 중 장파복사의 영향을 가장 많이 받으며, 변동성 또한 유사한 것으로 알려져 있다(Choi et al., 2012, 2014). 장파복사는 흑체(blackbody)의 유무 및 증가·감소

에 가장 많은 영향을 받으며, 대기 중에는 에어로졸과 같은 부유물질의 증가가 가장 많은 영향을 끼친다. 따라서 대기 상층으로 갈수록 점차적으로 기온 및 장파복사의 추세가 증가하는 현상은 환경오염으로 인한 검댕 등의 연직 에어로졸 혼합물의 증가에 기인한다(Chung and Seinfeld, 2005). 또한, 약 7.5 km 정도에 해당하는 400 hPa에서는 아래 층에 해당하는 500 hPa (약 5.5 km) 대비 장파복사가 0.02 W/m²/yr 가량 감소하는 추세를 보인다. 이는 에어로졸의 오염 물질이 대기 중에서 3 ~ 5 km 범위에 집중되어 분포함에 따라, 400 hPa 정도의 대기 상층에서는 에어로졸 등의 영향이 적었기 때문으로 판단된다(Ramanathan and

Table 4. Predominant wind direction and percentage by vertical pressure in winter of Gwangju area using radiosonde

Pressure (hPa)	Wind direction (°)	Percentage (%)
400	W	57.7
500	W	49.2
700	WNW	31.0
850	NW	32.0
925	NNW	26.2
1,000	N	24.2

Carmichael, 2008).

Table 4는 광주의 라디오존데를 활용하여 연직 기압에 따른 주풍향과 비율에 대해서 나타낸다. 연직 기압에 따른 주풍향은 지형 및 거칠기 등의 국지적인 효과를 가장 많이 받는 최하층인 1,000 hPa를 제외하고, 모든 기압에서의 풍향은 서쪽 계열을 포함하고 있으며, 주풍향의 비율은 고도가 상승함에 따라 증가하는 추세를 보였다. 특히, 500 hPa 이상의 고도에서는 주풍향의 비율이 50% 이상을 보일 정도로 지배적인 경향을 나타내었다. 검댕은 아시아 대륙 중에서도 중국과 인도에서 높게 나타나며, 검댕과 합해진 환경오염물질은 국지적인 기후변화와 함께 역학적인 이동을 통해 다소 떨어진 지역의 기후변화에도 영향을 줄 수 있다(Chung and Seinfeld, 2005; Menon et al., 2002). 즉, 광주지역의 대기 상층은 서풍 계열의 바람이 지배적임에 따라 산업현장에서 배출되는 환경오염물질들이 유입되어 연직 장파복사 추세에 영향을 준 것으로 판단되며, 추후 연구를 통한 분석이 필요하다.

4. 결론

본 연구는 우리나라의 고도에 따른 기후변화 경향을 확인하고자 50년간의 기상청 관측자료와 9년간의 산림청 관측자료, 45년간의 라디오존데 관측자료를 활용하여 기온, 상대습도, 포화수증기압을 대상으로 각 기상요소별 연평균에 따른 추세를 지점별 분포와 연직의 분포에 대해 분석하였으며, 얻어진 결과는 다음과 같다.

기상청 ASOS 60지점의 50년간 관측자료를 평균하여 우리나라 기온의 추세를 살펴보면 평균기온(1.34°C/50yr), 최고기온(1.73°C/50yr), 최저기온(0.47°C/50yr), 그리고 일교차(1.26°C/50yr)는 모두 증가하는 추세를 보였으며, 특히 최고기온의 추세는 최저기온의 추세의 3.6배에 해당한다. 지점별 기상요소 추세 분포에서는 평균기온과 최고기온

은 대부분의 지점이 증가하는 추세를 보였다. 또한 최고기온은 산악지형이 인근에 위치한 평지지형 보다 0.01°C/yr 더 높은 특징을 보였다. 광역시 정도의 대도시는 구조물로 인한 축열용량과 인공열로 인해 야간 복사냉각 효과가 억제됨에 따라, 최저기온의 추세는 증가하는 추세를 보였고, 이에 따라 일교차는 유지되거나 약간 증가하는 추세를 나타내었다. 교외지역에서는 전반적으로 최고기온의 증가추세와 최저기온의 감소 추세의 영향으로 일교차의 추세가 증가하였다, 상대습도는 모든 지점에서 감소하는 추세를 나타내고, 포화수증기압은 증가하는 추세를 보이는데, 이러한 경향은 해안지역에서 내륙지역으로 갈수록 더욱 강해졌다. 기상청 ASOS 60지점과 산림청 AMOS 61지점의 9년간 관측자료를 활용한 지점별 기상요소 추세 분포의 경우 평균기온과 최고기온은 대부분의 관측지점에서 증가하는 분포를 보였으며, 특히 강원도와 경상남도 지역에서의 최고기온은 0.15°C/yr 이상의 강한 증가 추세를 나타내었다. 또한 일부 관측지점에서는 인접한 위치에 있으나 해발고도의 차이로 인하여 0.054 ~ 0.125°C/yr의 추세 차이를 보였다. 일교차의 추세 분포는 일부 해안가 및 산악지형을 제외한 지역에서는 대체로 일교차의 증가 추세가 두드러졌다. 산악지형에 대해 최저기온의 구간별 비율을 확인해본 결과, 영하 기온의 비율은 매년 0.6% 가량이 감소하는 추세를 보였다. 즉, 기후변화로 인한 영하 기온의 비율 감소는 적설의 감소로 이어지게 되고, 이는 지표면의 알베도 감소에 영향을 줌에 따라 산악지형의 최고기온 추세가 증가한 것으로 판단된다. 상대습도는 감소 추세를 보이며, 특히 태백산맥 인근의 산악지형에서 감소 추세가 더욱 두드러졌다. 포화수증기압은 상대습도와 반비례하는 특성을 보임에 따라 전반적으로 증가하는 추세를 나타내었으며, 태백산맥에서 포화수증기압의 증가 추세를 보였다. 45년간 광주의 라디오존데 관측자료를 활용한 연직의 기온과 장파 분석에서는 기온이 연직의 고도와 비례하여 증가하는 추세를 확인하였다. 32년간의 자료를 활용하여 연직의 기온과 장파복사를 비교한 결과 두 기상요소의 추세는 전반적으로 유사한 경향을 보였다. 이를 통해 우리나라의 지상과 대기 상층의 기온은 대부분의 고도 분포에서 증가 추세를 보였으며, 기온의 증가 추세는 고도와 비례하여 증가하였다.

연직의 기후변화에 대해서 분석한 결과, 기온의 추세가 증가하는 원인은 고도에 따라 다르게 분석되었다. 사람의 생활권과 연결된 낮은 고도에서는 구조물의 증가에 의한 열축적 용량 증가 및 인공열의 증가, 산악지형이 주류를

이루는 높은 고도에서는 영하의 기온 비율 감소로 인한 적설의 감소가 직접적인 원인으로 분석되었다. 대기 상층에서는 환경오염물질의 증가로 인해 야기된 장파복사의 증가가 기온의 증가로 이어진 것으로 판단되나, 명확한 분석을 위해서는 추후 연구가 필요로 하다.

기후변화는 지속적으로 일어나고 있으며, 기후변화의 감소 및 유지를 위해서는 과거의 장기간 관측자료를 기반으로 한 기후변화의 척도가 필요로 한다. 본 연구는 2차원적인 관점이 아닌 3차원적인 관점에서 장기간의 기상청 ASOS 관측자료 이외에도 산림청 AMOS 관측자료(고도가 높은 61지점)와 라디오존데 연직자료(광주지역)를 기반으로 기후변화 특성을 분석한 연구로, 추후 우리나라의 3차원적인 기후변화 척도를 정의 시 기초자료로 활용할 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 국립기상과학원 ‘수요자 맞춤형 기상정보 산출기술개발 연구(KMA2018-00622)’의 지원으로 수행되었습니다.

References

Brohan P, Kennedy JJ, Harris I, Tett SFB, Jones PD. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *J Geophys Res Atmos* 111: D12106. doi: 10.1029/2005JD006548

Cho H, Choi KS. 2021. Analysis of trend and variation characteristics of UNEP and MDM climate indices: The case study of Chungcheong-do province. *J Korea Water Resour Assoc* 54(11): 999-1009 (in Korean with English abstract). doi: 10.3741/JKWRA.2021.54.11.999

Choi DH, Lee BY, Jeong HS. 2014. Comparison of meteorological elements by type of city during summer season. *J Korean Sol Energy Soc* 34(6): 111-122 (in Korean with English abstract). doi: 10.7836/kses.2014.34.6.111

Choi DH, Lee BY, Jeong HS. 2015. Observation and analysis of radiation characteristics according to the type of city during the summer season. *J Korean Sol*

Energy Soc 35(2): 21-31 (in Korean with English abstract). doi: 10.7836/kses.2015.35.2.021

Choi DH, Lee BY, Oh HY. 2012. Observation and analysis of the long and short wave radiation according to different altitudes and locations in Daegu during summer. *J Korean Sol Energy Soc* 32(4): 71-81 (in Korean with English abstract). doi: 10.7836/kses.2012.32.4.071

Choi G, Kwon WT, Boo KO, Cha YM. 2008. Recent spatial and temporal changes in means and extreme events of temperature and precipitation across the Republic of Korea. *J Korean Geograph Soc* 43(5): 681-700 (in Korean with English abstract).

Chung SH, Seinfeld JH. 2005. Climate response of direct radiative forcing of anthropogenic black carbon. *J Geophys Res Atmos* 110: D11102. doi: 10.1029/2004JD005441

Conway H, Gades A, Raymond CF. 1996. Albedo of dirty snow during conditions of melt. *Water Resour Res* 32(6): 1713-1718. doi: 10.1029/96WR00712

Groisman PY, Knight RW, Easterling DR, Karl TR, Hegerl GC, Razuvaev VN. 2005. Trends in intense precipitation in the climate record. *J Clim* 18(9): 1326-1350. doi: 10.1175/JCLI3339.1

Hansen J, Ruedy R, Sato M, Imhoff M, Lawrence W, Easterling D, Peterson T, Karl T. 2001. A closer look at United States and global surface temperature change. *J Geophys Res Atmos* 106(D20): 23947-23963. doi: 10.1029/2001JD000354

Henderson-Sellers A. 1992. Continental cloudiness changes this century. *GeoJournal* 27(3): 255-262. doi: 10.1007/bf02482666

Ho CH, Lee JY, Ahn MH, Lee HS. 2003. A sudden change in summer rainfall characteristics in Korea during the late 1970s. *Int J Climatol* 23(1): 117-128. doi: 10.1002/joc.864

Hong KO, Suh MS, Rha DK. 2006. Temporal and spatial variations of precipitation in South Korea for recent 30 years (1976-2005) and geographic environments. *J Korean Earth Sci Soc* 27(4): 433-449 (in Korean with

- English abstract).
- Ishi T, Kondo J. 1993. Seasonal variation of heat balance in the East China and Its vicinity ocean heat transport and ocean storage of heat. *Tenki* 40(5): 3-18.
- Jeon HE, Ha KJ, Kim HR. 2023. A study on characteristics of climate variability and changes in weather indexes in Busan since 1904. *Atmos* 33(1): 1-20 (in Korean with English abstract). doi: 10.14191/Atmos.2023.33.1.001
- Jung H.-S., Y. Choi, J.-H. Oh, G.-H. Lim. 2002. Recent trends in temperature and precipitation over South Korea. *Int J Climatol* 22: 1327-1337. doi: 10.1002/joc.797
- Karl TR, Jones PD, Knight RW, Kukla G, Plummer N, Razuvayev V, Gallo KP, Lindsey J, Charlson RJ, Peterson TC. 1993. A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bull Am Meteorol Soc* 74(6): 1007-1024. doi: 10.1175/1520-0477(1993)074<1007:ANPORG>2.0.CO;2
- Kondo J, 1976. Heat balance of the est Chine sea during the air mass transformation experiment. *J Meteorol Soc Japan* 54(6): 382-397.
- Kondo J, Miura A. 1985. Surface heat budget of the western pacific for May 1979. *J Meteorol Soc Japan* 63(4): 633-645.
- Korea Meteorological Administration. 2021. Climate change analysis report for 109 years (1912-2020) in Korea. Seoul: Author.
- Lau KM, Weng H. 1999. Interannual, decadal-interdecadal, and global warming signals in sea surface temperature during 1955-97. *J Clim* 12(5): 1257-1267.
- Lee MI, Kang IS. 1997. Temperature variability and warming on the Korean peninsula. *Atmos* 33: 429-443.
- Lee S, Kwon W. 2004. Changes in precipitation in summer in Korea. *J Korean Geogr Soc* 39: 819-832.
- Lugina KM, Groisman PY, Vinnikov KY, Koknaeva VV, Speranskaya NA. 2005. Monthly surface air temperature time series area-averaged over the 30-degree latitudinal belts of the globe [dataset]. Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), ESS-DIVE Repository. doi: 10.3334/cdiac/cli.003
- Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O, Roberts D, Skea J, Shukla P, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R. 2018. Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Masson-Delmotte VP, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Matthews JBR, Berger S, Huang M, Yelekçi O, Yu R, Zhou B, Lonnoy E, Maycock TK, Waterfield T, Leitzell K, Caud N. 2021. Climate change 2021: The physical science basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157896
- Menon S, Hansen J, Nazarenko L, Lup Y. 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science* 297(5590): 2250-2253. doi: 10.1126/science.1075159
- Moon J, Shim C, Jung O, Hong JW, Han J, Song YI. 2020. Characteristics in regional climate change over South Korea for regional climate policy measures: Based on long-term observations. *J Clim Change Res* 11(6-2): 755-770 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/ksccr.2020.11.6.755
- Moss R, Babiker M, Brinkman S, Calvo E, Carter T, Edmonds J, Elgizouli I, Emori S, Erda L, Hibbard K, Jones R, Kainuma M, Kelleher J, Lamarque JF, Manning M, Matthews B, Meehl J, Meyer L, Mitchell J, Nakicenovic N, O'Neill B, Pichs R, Riahi K, Rose S, Runci R, Stouffer R, Vuuren DV, Weyant J, Wilbanks T, Ypersele JPV, Zurek M. 2008. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.

- NGII (National geographic information institute). 2008. The geography of Korea. Suwon: Author.
- Ohmura A. 1984. On the cause of 'Fram' type seasonal change in diurnal amplitude of air temperature in polar regions. *J Climatol* 4(3): 325-338. doi: 10.1002/joc.3370040309
- Park MH, Kim HD. 2007. A study on the characteristics of urban dryness in Daegu. *J Environ Sci Int* 16(2): 171-178 (in Korean with English abstract). doi: 10.5322/jes.2007.16.2.171
- Ramanathan V, Carmichael G. 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nat Geosci* 1: 221-227. doi: 10.1038/ngeo156
- Rangwala I, Miller J, Xu M. 2009. Warming in the Tibetan Plateau: Possible influences of the changes in surface water vapor. *Geophys Res Lett* 36(6): L06703. doi: 10.1029/2009gl037245
- Rangwala I, Miller JR, Russell GL, Xu M. 2010. Using a global climate model to evaluate the influences of water vapor, snow cover and atmospheric aerosol on warming in the Tibetan Plateau during the twenty-first century. *Clim Dyn* 34(6): 859-872. doi: 10.1007/s00382-009-0564-1
- Scherrer S, Ceppi P, Croci-Maspoli M, Appenzeller C. 2012. Snow-albedo feedback and Swiss spring temperature trends. *Theor Appl Climatol* 110(4): 509-516. doi: 10.1007/s00704-012-0712-0
- Smith TM, Reynolds RW. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854-1997). *J Clim* 17(12): 2466-2477. doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<2466:ieros>2.0.co;2
- Stanhill G. 2001. The growth of climate change science: A scientometric study. *Clim Change* 48(2-3): 515-524. doi: 10.1023/A:1010721600896
- Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM. 2013. *Climate change 2013: The physical science basis*, intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- The Core Writing Team, Lee H, Romero J. 2023. *Climate change 2023: Synthesis report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Trenberth KE. 1999. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Clim Change* 42(1): 327-339. doi: 10.1023/A:1005488920935
- UN (United Nations). 2016. *Framework Convention on Climate Change: Report of the conference of the parties on its twenty-first session*. Paris: Author.
- Vernier JP, Thomason LW, Kar J. 2011. CALIPSO detection of an Asian tropopause aerosol layer. *Geophys Res Lett* 38(7): L07804. doi: 10.1029/2010GL046614
- Warren SG, Wiscombe WJ. 1980. A model for the spectral albedo of snow. II: Snow containing atmospheric aerosols. *J Atmos Sci* 37(12): 2734-2745. doi: 10.1175/1520-0469(1980)037<2734:AMFTSA>2.0.CO;2
- WMO (World Meteorological Organization). 2010. *WMO greenhouse gas bulletin No. 6: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2009*. Geneva: Author.
- Zhang H, Zhao S, Wang Z, Zhang X, Song L. 2016. The updated effective radiative forcing of major anthropogenic aerosols and their effects on global climate at present and in the future. *Int J Climatol* 36(12): 4029-4044. doi: 10.1002/joc.4613

부록

Table S1. Information by observation sites

ASOS			AMOS		
Station number (Site name)	Observation start date	Latitude / Longitude / Height	Station number (Site name)	Observation start date	Latitude / Longitude / Height
90 (Sokcho)	1968-01-01	38.2509 / 128.5647 / 17.5	1910 (Honglng)	2014-01-01	37.5938 / 124.0428 / 51.0
100 (Daegwallyeong)	1971-07-15	37.6869 / 128.7587 / 842.5	1912 (Mt_Cheonjang)	"	37.5984 / 127.0473 / 65.3
101 (Chuncheon)	1966-01-01	37.9026 / 127.7357 / 75.8	2891 (Mt_Hanseok)	"	38.0514 / 128.2566 / 1114.6
105 (Gangneung)	1911-10-03	37.7515 / 128.8910 / 27.1	2892 (Gadeugbong)	"	37.8461 / 128.1935 / 979.8
108 (Seoul)	1907-10-01	37.5714 / 126.9658 / 85.6	2893 (Bulballyeong)	"	37.6953 / 128.3168 / 1013.0
112 (Incheon)	1904-08-29	37.4777 / 126.6249 / 68.9	2894 (Gamtubong)	"	37.9569 / 128.5889 / 863.7
114 (Wonju)	1971-09-06	37.3375 / 127.9466 / 150.1	2895 (Jeonhujae)	"	37.8442 / 128.6319 / 794.1
115 (Ulleungdo)	1938-08-10	37.4813 / 130.8986 / 221.1	2896 (Sagimak)	"	37.7777 / 128.7480 / 451.6
119 (Suwon)	1964-01-01	37.2575 / 126.9830 / 39.8	2897 (Mt_Jaewang)	"	37.6896 / 128.7902 / 778.3
127 (Chungju)	1972-01-01	36.9705 / 127.9525 / 114.8	2898 (Mandeogbong)	"	37.6175 / 128.9049 / 1033.1
129 (Seosan)	1968-01-01	36.7766 / 126.4939 / 25.2	2899 (Seongalyeong)	"	37.7225 / 128.745 / 1154.8
130 (Uljin)	1971-01-12	36.9918 / 129.4128 / 48.9	2900 (Mt_Gariwang)	"	37.4686 / 128.5905 / 1061.1
131 (Cheongju)	1967-01-01	36.6392 / 127.4407 / 58.7	2901 (Bonghwachi)	"	37.4415 / 128.6965 / 949.0
133 (Daejeon)	1969-01-01	36.3720 / 127.3721 / 67.8	2902 (Galgogae)	"	37.5281 / 128.9351 / 861.7
135 (Chupungnyeong)	1937-01-11	36.2203 / 127.9946 / 244.9	2903 (Mt_Deokhang)	"	37.3393 / 129.0144 / 1005.1
138 (Pohang)	1943-01-01	36.0320 / 129.3800 / 3.9	2904 (Mt_Hambaek)	"	37.1611 / 128.9192 / 1558.2
140 (Gunsan)	1968-01-01	36.0053 / 126.7614 / 27.8	2905 (Mt_Sageum)	"	37.2035 / 129.1691 / 1081.6
143 (Daegu)	1907-01-31	35.8780 / 128.6530 / 54.2	2906 (Mt_Bachyang)	"	37.3021 / 128.1255 / 754.3
146 (Jeonju)	1918-06-23	35.8409 / 127.1172 / 60.4	2907 (Mt_Saja)	"	37.4260 / 128.2561 / 811.9
152 (Ulsan)	1932-01-06	35.5824 / 129.3347 / 81.1	2908 (Mt_Nam-byeong)	"	37.4111 / 128.4388 / 875.1
156 (Gwangju)	1939-05-01	35.1729 / 126.8916 / 70.2	2909 (Mt_Daehak)	"	37.6697 / 128.0750 / 560.0
159 (Busan)	1904-04-09	35.1047 / 129.0320 / 69.5	2911 (Mt_Gari)	"	37.8545 / 127.9284 / 743.2
162 (Tongyeong)	1968-01-01	34.8454 / 128.4356 / 31.2	3891 (Mt_Jangseok)	"	37.0939 / 128.1774 / 402.9
165 (Mokpo)	1904-04-08	34.8173 / 126.3815 / 44.7	3892 (Mt_Cheoneung)	"	37.0857 / 127.9991 / 424.5
168 (Yeosu)	1942-03-01	34.7393 / 127.7406 / 65.9	3893 (Mt_Wontong)	"	37.0883 / 127.6766 / 322.8
170 (Wando)	1971-01-31	34.3959 / 126.7018 / 35.3	3894 (Mt_Bakdal)	"	36.8102 / 127.9202 / 438.5
184 (Jeju)	1923-05-01	33.5141 / 126.5297 / 20.7	3895 (Mt_Nam)	"	36.9568 / 127.9794 / 553.0
188 (Seongsan)	1971-07-15	33.3868 / 126.8802 / 20.3	3896 (Dosolbong)	"	36.8455 / 128.4249 / 711.7
189 (Seogwipo)	1961-01-01	33.2462 / 126.5653 / 51.8	3897 (Mt_Paleum)	"	36.3504 / 127.8795 / 396.5
192 (Jinju)	1969-03-01	35.1638 / 128.0400 / 29.3	3898 (Mt_Geumdan)	"	36.6120 / 127.7892 / 627.4
201 (Ganghwa)	1972-01-11	37.7074 / 126.4463 / 47.8	3899 (Mt_Tap)	"	36.3236 / 127.6436 / 359.4
202 (Yangpyeong)	1972-01-11	37.4886 / 127.4945 / 47.2	3900 (Mt_Sambong)	"	36.1300 / 127.8436 / 647.4
203 (Icheon)	1972-01-11	37.2640 / 127.4842 / 80.0	7891 (Mt_Cheongok)	"	37.0433 / 128.9624 / 1279.3
211 (Inje)	1971-12-01	38.0599 / 128.1671 / 201.7	7892 (Keonjae)	"	36.9584 / 128.9622 / 832.0
212 (Hongcheon)	1971-09-27	37.6836 / 127.8804 / 140.2	7893 (Mt_Tonggo)	"	36.8984 / 129.1922 / 1071.3
221 (Jecheon)	1972-01-11	37.1593 / 128.1943 / 264.6	7894 (Gajaemijae)	"	36.7758 / 129.3716 / 359.6
226 (Boeun)	1972-01-09	36.4876 / 127.7342 / 171.3	7895 (Mt_Agu)	"	36.9965 / 129.2886 / 646.7

Table S1. Information by observation sites

ASOS			AMOS		
Station number (Site name)	Observation start date	Latitude / Longitude / Height	Station number (Site name)	Observation start date	Latitude / Longitude / Height
232 (Cheonan)	1972-01-08	36.7796 / 127.1213 / 21.3	7896 (Janggunbong)	"	36.8534 / 129.0862 / 1135.6
235 (Boryeong)	1972-01-24	36.3272 / 126.5574 / 9.9	7897 (Mt_Hambak)	"	36.6738 / 129.0870 / 575.9
236 (Buyeo)	1972-01-09	36.2724 / 126.9208 / 13.4	7898 (Mt_Myeongdong)	"	36.5166 / 129.2453 / 811.2
238 (Geumsan)	1972-01-09	36.1056 / 127.4818 / 172.6	7899 (Yongbayeri)	"	36.5698 / 128.9083 / 399.4
243 (Buan)	1972-03-01	35.7296 / 126.7166 / 12.2	7900 (Mt_Gamyeon)	"	36.3671 / 129.0482 / 566.1
244 (Imsil)	1970-06-02	35.6120 / 127.2856 / 247.0	7901 (Mt_Dokgeong)	"	36.6148 / 129.2475 / 681.7
245 (Jeongeup)	1970-01-05	35.5634 / 126.8390 / 68.7	7902 (Satgatbong)	"	36.4111 / 129.3185 / 270.0
247 (Namwon)	1972-01-04	35.4213 / 127.3965 / 133.4	7903 (Mt_Naeyeon)	"	36.2176 / 129.2639 / 701.5
260 (Jangheung)	1972-01-21	34.6889 / 126.9195 / 44.0	7904 (Mt_Johang)	"	35.9733 / 129.4684 / 215.7
261 (Haenam)	1971-02-03	34.5538 / 126.5691 / 16.3	7905 (Mt_Juwol)	"	36.3156 / 128.8044 / 438.3
262 (Goheung)	1972-01-22	34.6183 / 127.2757 / 51.9	8891 (Hyeongjeongbong)	"	35.2055 / 127.6847 / 1091.9
272 (Yeongju)	1972-11-28	36.8718 / 128.5169 / 211.3	8892 (Mukgyejae)	"	35.2299 / 127.7511 / 680.2
273 (Mungyeong)	1973-01-01	36.6273 / 128.1488 / 173.0	8893 (Wangeungjae)	"	35.4014 / 127.7810 / 587.7
277 (Yeongdeok)	1972-01-03	36.5334 / 129.4093 / 40.7	8894 (Mt_Bubhwa)	"	35.4543 / 127.7132 / 688.1
278 (Uiseong)	1973-01-01	36.3561 / 128.6886 / 81.4	8895 (Hyangrobong)	"	34.9686 / 128.1665 / 372.5
279 (Gumi)	1973-01-01	36.1306 / 128.3206 / 49.1	8896 (Danjibong)	"	35.7999 / 127.9887 / 781.9
281 (Yeongcheon)	1972-01-21	35.9774 / 128.9514 / 96.1	8897 (Daegibong)	"	34.7483 / 128.0225 / 278.8
284 (Geochang)	1972-01-24	35.6712 / 127.9110 / 221.4	8899 (Mt_Yongchui_sisaldeung)	"	35.4768 / 129.0020 / 757.0
285 (Hapcheon)	1973-01-01	35.5651 / 128.1699 / 26.7	8900 (Mt_Neungdong)	"	35.5776 / 129.0083 / 935.1
288 (Miryang)	1973-01-01	35.4915 / 128.7441 / 8.3	8901 (Mt_Cheonju)	"	35.2747 / 128.5899 / 501.1
289 (Sancheong)	1972-03-30	35.4130 / 127.8791 / 138.2	8902 (Mt_Silbong)	"	35.1266 / 128.0677 / 100.1
294 (Geoje)	1972-01-24	34.8881 / 128.6045 / 44.8	8903 (Mt_Dunchel)	"	35.3821 / 127.9755 / 520.3
295 (Namhae)	1972-01-24	34.8166 / 127.9264 / 45.7	8904 (Mt_Hanu)	"	35.4069 / 128.2088 / 698.5
	Radiosonde		8905 (Mt_Bulmo)	"	35.2052 / 128.7648 / 481.9
47 156 (Gwangju)	1978-05-01	35.1166 / 126.8160 / 13.0	-	-	-