

강원 지역의 장기 겨울철 강수 및 강설 변화의 경향 분석

백희정[†] · 안광득 · 주상원 · 김윤재

기상청 수치모델링센터

Long-term Changes in Wintertime Precipitation and Snowfall over Gangwon Province

Baek, Hee-Jeong[†], Ahn, Kwangdeuk, Joo, Sangwon and Kim, Yoonjae

Numerical Modeling Center, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

ABSTRACT

The effects of recent climate change on hydrological systems could affect the Winter Olympic Games (WOG) because the event is dependent on suitable snow and ice conditions to support elite-level competitions. We investigate the long-term variability and change in winter total precipitation (P), snowfall water equivalent (SFE), and ratios of SFE to P during the period 1973/74~2015/16 in Gangwon province. The climatological percentages of SFE relative to winter total precipitation were 71%, 28%, and 44% in Daegwallyeong, Chuncheon, and Gangneung, respectively. The winter total P, SFE, and SFE/P has decreased (but not significantly), although significant increases of winter maximum and minimum temperature were detected at a 95% confidence level. Notably, a significant negative trend of SFE/P at Daegwallyeong in February, the month of the WOG, was attributable to a larger decrease in SFE related to the increases in maximum and minimum temperature. Winter wet-day minimum temperatures were warmer than climatological minimum temperatures averaged over the study period. The 20-year return values of daily maximum P and SFE decreased in Yongdong area. Since the SFE/P decrease with increasing temperature, the probability of rainfall rather than snowfall can increase if global warming continues.

Key words: Global Warming, Winter Precipitation, Snowfall Water Equivalent, Ratios of Snowfall Water Equivalent to Precipitation, Winter Olympic Games, Trends, Variability

1. 개 요

세계적 축제인 동계올림픽 개최는 사회, 경제, 환경면에서 개최도시에 영향을 크게 미치며, 특히 성공적인 개최 여부는 기상상태에 크게 의존한다. Ruttly *et al.*(2015)은 올림픽 경기에 있어서 기상으로 인한 위험요소를 관리하기 위해서 지난 90년 동안 시행되어온 노력들(실내경기로의 전환, 인공강설, 선진 기상예보 등)을 제시하였다. 그러나 기상 위험 요소의 극복을 위하여 동계올림픽의 일부 경기 종목이 실내경기로 전환되어 진행되었지만 여전히 일부 경기들은 특정한 기후와 지형이 요구되기 때문에 동계올림픽 개최지는 제한된다(Scott *et al.*, 2015). 이러한 측면에서 우리나라 겨울철 강수량의 최대지역이자 강원도 산악지역에 위치한 평창지역이 2018년 동

계올림픽 개최지로 선정되었다. 즉, 제 23차 동계올림픽이 2018년 2월 9일부터 25일까지, 제 13차 동계 패럴림픽이 2018년 3월 9일부터 18일에 설상경기는 평창 산악지역 클러스터에서, 빙상경기는 강릉에서 열릴 예정이다.

기후변화에 관한 정부간협의체(International Panel on Climate Change; IPCC) 5차 평가보고서는 인간의 온실가스 배출에 따른 인위적 기후변화로 인하여 지구 온난화가 진행 중이며, 전 지구 평균 기온이 1901년부터 2012년에 0.89°C 상승하였다고 보고하였다(IPCC, 2013). 20세기 이후 지구 온난화로 인하여 우리나라 또한 기온 상승이 나타나고 있으며, 1960~2012년 사이에 연평균 기온은 0.23°C decade⁻¹ 비율로 증가하였고, 특히 겨울철 기온 증가가 여름철 기온 증가보다 더 컸다(Min *et al.*, 2015). 기온 상승으로 대변되는 지구 온난화는 단

[†] Corresponding author: baek.heejeong@gmail.com

Received July 7, 2016 / Revised September 28, 2016 1st, May 16, 2017 2nd / Accepted June 1, 2017

순히 기온 상승으로 끝나는 것이 아니라, 지면, 대기, 해양 온도 및 빙하와 적설면적, 해빙, 해수면 고도, 대기 중 수증기에 서의 변화를 동반한다(IPCC, 2013). Ruttly *et al.*(2015)은 지난 90년 동안 동계올림픽 개최지의 2월 기온을 분석한 결과, 1920~1950년에는 0.4°C에서 21세기에 개최된 경기에서는 7.8°C까지 상승함에 따라 올림픽 기간에 기후변화로 인한 위험 요소의 관리의 중요성을 피력하였다. 즉, 동계올림픽 경기 운영을 위해서는 개최장소의 눈과 빙상의 상태를 최상으로 유지하여야 하나, 지구온난화가 물순환에 영향을 주어 적설 면적의 감소를 가져오거나, 봄철 이른 눈녹음과 강설이 아닌 강우 형태의 강수 현상을 가져오는 등의 변화를 가져올 수 있다(Trenberth, 2011). 강수는 시공간적으로 기온보다 변동성이 커서 기온과는 달리 지구 온난화에 대한 변화를 결정하는데 어려움이 있으며, 지구평균적인 측면보다는 지역별 변화에 대한 연구 지역별 변화에 대한 연구들이 다수 존재하였고, 특히 북미와 유라시아를 중심으로 강설 변화 추세에 대한 연구들이 주로 수행되었다(Kunkel *et al.*, 2009; Mekis and Vincet, 2011; Takeuchi *et al.*, 2008; Shekar *et al.*, 2010; Rebetz, 1996; Scherrer and Appenzeller, 2006; Scherrer *et al.*, 2013; McCabe *et al.*, 2007, Ye *et al.*, 2008; Cohen *et al.*, 2015).

강수에 대한 강설의 비율에 대한 연구로서, Serquet *et al.* (2011)은 1961년 이후 강설일수와 강우일수를 분석하여 스위스에서 강우일수에 대한 강설 일수의 비율은 기온 증가와 관련해서 감소하고 있음을 보였다. 또한 Knowles *et al.*(2006)은 미서부 지역에서 겨울철 습윤일의 최저기온이 상승함에 따라 강설량의 감소가 나타났으며, 강수량 대비 강설량의 비율 또한 줄어들어 겨울철에 눈보다는 비로 내리는 경우가 더 많이 나타났음을 보였다. Huntington *et al.*(2003)에 의하면 1949~2000년 사이에 영국에서 겨울철 총강수량에 대한 눈의 비율은 감소하였는데, 이는 강설 감소가 주된 원인이었으며, 강수 증가가 일부 기여하였음을 보였고, 특히 3월과 12월에 통계적으로 유의한 감소 추세가 반영된 결과였다.

우리나라 연강수량은 100년(1913~2012) 동안 $1.76 \text{ \%decade}^{-1}$ 비율로 통계적으로 유의하게 증가 추세를 보였으며, 특히 여름철 증가율이 $2.62 \text{ \%decade}^{-1}$ 로 매우 높게 나타났으나, 겨울철 강수량은 통계적으로 유의하지는 않지만 감소하는 경향을 보였다(Baek *et al.*, 2016). 그러나 동계올림픽이 개최될 평창 지역을 포함한 강원 지역의 겨울철 강설에 대한 연구는 주로 영동지역 겨울철 강수 및 강설 자료에 기반한 기단 및 바람 특성 분석과 대설 사례에 따른 중관 패턴 및 원인 분석들(Cho *et al.*, 2004; Cho and Kwon, 2012; Chung *et al.*, 2004; Kwon *et al.* 2014, Song *et al.*, 2016)이며, 장기적인 변화 추세에 대

한 연구는 적은 편이다. 다만 Lee *et al.*(2011)은 98년(1912~2009) 강릉 관측자료를 이용하여, 연강수량은 14.7% 증가했으나, 겨울철 강수량은 감소하였고, 1938~2008년간 강설량 변화는 유의한 결과는 없으나, 강설일수는 감소하는 경향을 보임을 밝혔다. 따라서 이 연구에서는 지구온난화에 따른 평창 동계올림픽 개최지의 강수량 및 강수 형태 변화의 이해 증진을 위하여 장기적인 강수 및 적설 관측 자료를 활용하여 겨울철 강수량뿐만 아니라, 강수량에 대한 강설량의 상대적 기여에 대한 장기적인 변화 추세를 살펴보고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

기상청은 평창 동계올림픽 기상지원을 위하여 2012년 말부터 개최지를 중심으로 자동기상관측장비를 설치하여 관측을 수행하고 있으나, 장기적인 겨울철 강수 및 강설 변화 추세를 분석하기 위해서는 기간이 매우 짧다. 강원도에서 40년 이상 장기 관측자료를 보유하고 있는 기상관측 지점 중에서 동계올림픽 설상경기가 열리는 평창 클러스터에 가장 인접한 기상관측 지점은 대관령 지점이 유일하다. 또한 강릉은 동계올림픽 빙상경기가 열리는 장소이며, 춘천은 강원도 관측 지점 중에서 적설관측 방법이 변경되지 않은 유일한 지점이므로, 강원도 산악, 영서, 영동 지역을 대표할 수 있는 대관령, 춘천, 강릉을 분석 지점으로 선정하였다(Table 1). 평창 동계올림픽 주경기장에서부터 지형을 고려하지 않고 각 관측지점까지 직선거리는 대략 대관령은 1.5 km, 강릉은 19 km, 춘천은 89 km 정도이다. 분석 기간 및 사용된 관측 변수는 1973년 11월부터 2016년 3월까지 일 강수량 및 신적설량, 최고·최저 기온, 이슬점온도이다. 대관령에서는 11월에도 눈이 관측되고, 패럴림픽이 3월에 개최되므로 이 연구에서 겨울철(NDJFM)은 11월부터 다음 해의 3월까지로 정의하여 사용하였다. 예를 들어 1973/74년 겨울은 1973년 11월부터 1974년 3월까지이며, 1973년 11월부터 2016년 3월까지 일 자료를 활용하여 겨울철 전체에 대해서 뿐만 아니라, 겨울철 기간 중 월별(11월: NOV,

Table 1. Information on meteorological observation stations used in this study

Station number	Station name	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Height (m)
100	Daegwallyeong	37°40′	128°43′	772.4
101	Chuncheon	37°54′	127°44′	75.6
105	Gangneung	37°45′	128°53′	26.0

12월: DEC, 1월: JAN, 2월: FEB, 3월: MAR) 자료로 변환하고, 강수량, 강설량, 강수량에 대한 강설량 비의 변화 경향을 분석하였다.

장기적인 추세 분석에 있어서 관측소 및 기기 변경 등의 비기후적 요인에 의한 노이즈를 최소화한 자료 확보가 중요하다. 대관령 기상대는 분석 기간 중 1986년 8월과 2006년 11월에 관측 노장을 이전하여(Daegwallyeong Weather Station, 2007), 자료 불연속이 존재할 것으로 사료되지만, 동계올림픽이 개최되는 평창 지역에서 유일하게 존재하는 장기관측 지점이므로 분석에 사용하였다.

한편, 대관령, 춘천, 강릉 지점의 적설 관측은 2008년까지 유인관측소로 운영되면서 목측 관측으로 수행되었다. 그러나 현재까지 목측관측이 수행되는 지점은 춘천뿐이며, 강릉 지점은 강원지방기상청의 이전으로 2009년부터 초음파 및 CCTV 관측 등으로 관측 방법이 변경되어 왔고, 대관령 지점은 2005년 11월부터 CCTV 관측으로 관측방법이 변경되었다. 관측방법의 변경은 신적설량에 차이를 가져오기 때문에(Korea Meteorological Administration, 2013) 이 연구에서는 일 신적설량은 눈의 유무만 판단하고, 겨울철 눈의 변화 추세에 대한 연구를 위해서 강설량(snowfall liquid water equivalent; SFE) (Knowles, 2006) 개념을 도입하였다. Knowles *et al.*(2006)에 따르면, 일 강설량은 신적설(Snow depth, S)이 관측된 날의 일 강수량(Precipitation, P)으로 정의된다. 즉, 일 강설량은 하루 중 신적설이 관측될 때($S>0$)의 일 강수량이며, $S=0$ 이면 $SFE=0$ 이 된다. 일강수량과 강설량을 매년 겨울철 각 달 및 겨울철 전체에 대해 합산하여 시계열을 구성한 다음, 매년 월별, 겨울철 강수량 대비 강설량의 비(SFE/P)의 시계열을 구성하게 된다. 이 경우에 강수가 눈과 비의 혼합으로 나타나는 날에 대해서는 다소 과다하게 일강설량을 산정하게 되고, 이에 따라 SFE/P 비율은 과대평가되고, SFE/P 비율의 추세는 과소평가되는 측면이 있다.

최소자승 선형 회귀법을 사용하여 지점별 월 및 겨울철 P, SFE, SFE/P 에 대한 변화 경향을 탐지하며, 겨울철 강수량 및 강설량 변화의 이해 증진을 위하여 최고기온, 최저기온, 이슬점온도의 추세 분석을 수행하였다. 또한 SFE/P 의 변동에 대한 P와 SFE의 기여 및 겨울철 강수와 기온과의 관련성을 알아보기 위해서 상관 분석을 수행하였다. 추세 분석 및 상관 분석 결과는 신뢰수준 95%에서 양측 t 검정(two-tailed t -test)을 통하여 유의성을 평가하였다. GEV(Generalized Extreme Value)는 기상과 수문 분야에서 극한 사상 평가에 주로 사용되어 왔으며(Zwiers and Kharin, 1998), 이 연구에서는 L-moment 기법을 통한 GEV 분포를 산출하고, Kolmogorov-Smirnov 검정

을 통해 산출된 분포의 적합도를 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 평가하였다. 적합한 GEV 분포를 통해 얻어진 분석 기간 중 상반기 21년(PI: 1973/74~93/94)과 하반기 21년 (PII: 1995/96~2015/16)의 일최대 강수량 및 강설량의 20년 재현값을 결정하여 그 변화를 평가하였다. 즉, 매년 각 달 및 겨울철 중 일 강수량이나 강설량이 가장 큰 값을 산출하고, 이 시계열에 GEV 분포를 적합시켜서 겨울철 일 강수량 및 강설량 극한 사상의 20년 재현값을 계산하였다.

3. 결 과

3.1 기후학적 특성

장기적인 추세 분석 이전에 대관령, 춘천, 강릉 지점의 기후학적 특성을 파악하기 위하여 Fig. 1에 43년간(1973/74~2015/16) 세 지점의 겨울철 P, SFE, SFE/P 에 대한 시계열을 나타내었다. 시계열의 변동성은 전반적으로 크며, 영서 지역에 위치한 춘천 지점은 영동지역에 위치한 강릉과 대관령에 비해 강수량과 강설량이 더 적고, 변동 경향도 다르게 나타났다. 즉, 겨울철 대관령 강수량과 비교했을 때 강릉 강수량과의 상관 계수는 0.80이나, 춘천 강수량과는 0.54로써 태백산맥 동쪽에 위치한 대관령과 강릉의 겨울철 강수량 변동성의 80%는 유사한 메커니즘에 의해 설명될 수 있음을 알 수 있을 것이다. 그러나 영동 산악지역에 위치한 대관령 강설량과 영동 해안에 위치한 강릉의 강설량의 상관계수는 0.66으로써 강수량의 상관성보다는 낮지만, 여전히 95% 신뢰도에서 유의하며, 유사한 변동성을 보였다. 대관령 강설량 변동성의 상관성은 영서에 위치한 춘천 강설량과 0.38로 95% 신뢰수준에서 유의하지만, 대관령 SFE/P 는 춘천과 0.16의 상관성을 보여, 영서 지역에서의 SFE/P 변화는 영동 지역과 다른 변동 특성을 보임을 알 수 있다.

총 분석기간 43년에 대해 평균된 대관령, 춘천, 강릉 겨울철 강수량은 각각 281.9 mm, 149.3 mm, 304.9 mm로써 춘천 강수량은 영동 지역 강수량의 반 정도에 해당하였다(Fig. 2). 강설량의 경우에는 각각 201.1 mm, 42.1 mm, 134.5 mm로 산악 지역에 위치한 대관령에서 가장 많았고, 강릉은 두 지역에 비해서 겨울철 기온이 높아 강수량은 가장 많았지만, 강설량은 대관령보다 적었으며, 춘천의 강설량은 대관령의 1/5 수준을 나타내었다. 이에 따라 43년 평균된 SFE/P 는 각각 0.71, 0.28, 0.44로써 영동 산악지대인 대관령에서는 겨울철 강수량의 71% 정도가 강설로 나타났으나, 강릉에서는 44%, 춘천에서는 28% 정도를 차지하여 춘천에서는 겨울철에도 강설보다

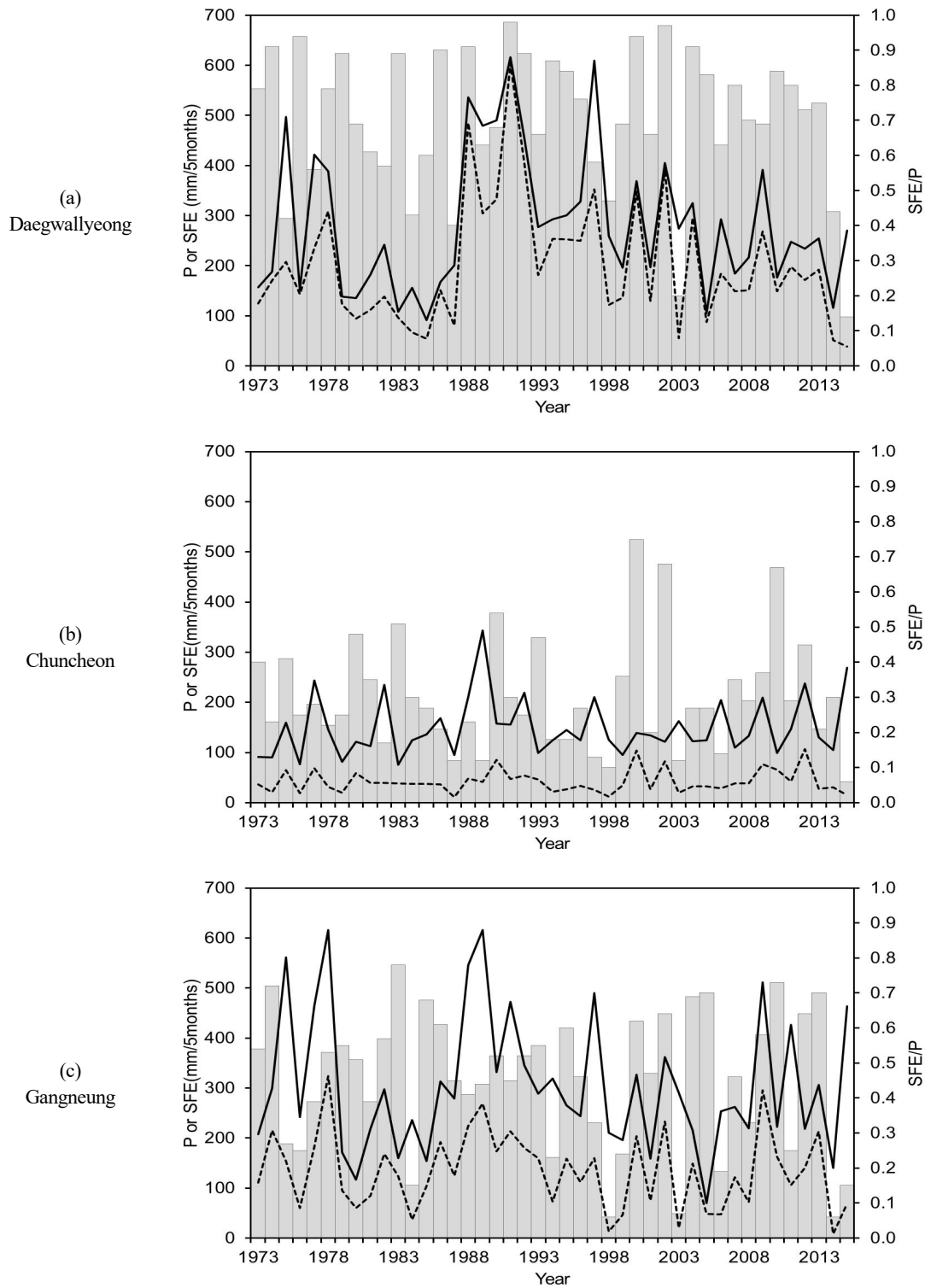


Fig. 1. Time series of winter (NDJFM) precipitation (P) amount (solid line), snowfall liquid-water equivalent (SFE) amount (dotted line), and the ratio of SFE to P (bar) from 1973/1974 to 2015/2016 in (a) Daegwallyeong, (b) Chuncheon, and (c) Gangneung.

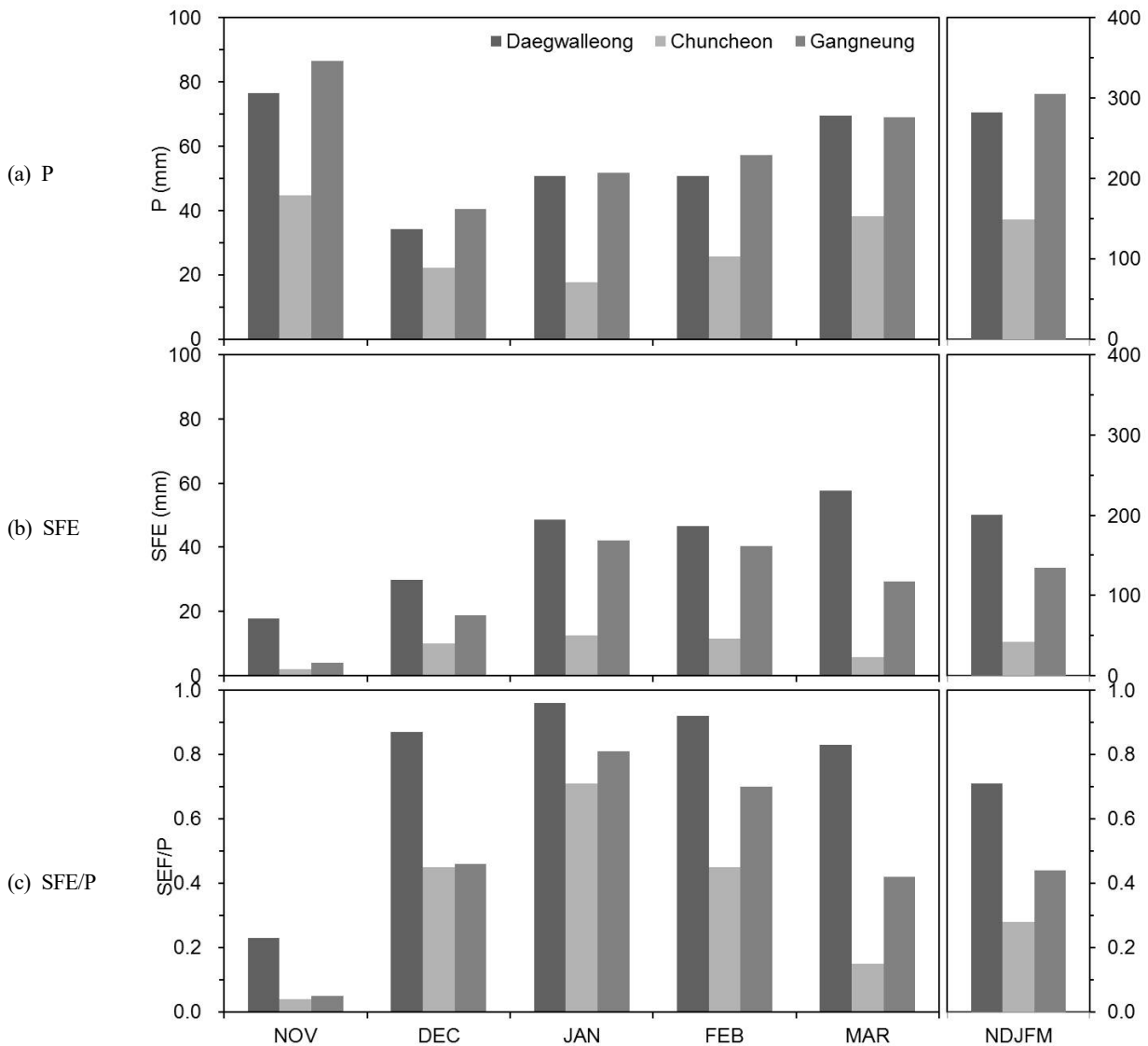


Fig. 2. Mean monthly (NOV, DEC, JAN, FEB, MAR) and winter (NDJFM) (a) P, (b) SFE, and (c) SFE/P for the period 1973/1974~2015/2016 in Daegwallyeong, Chuncheon, and Gangneung.

는 강우가 나타난 경우가 더 많았음을 알 수 있다. 참고로 전 해의 12월부터 다음해 2월(DJF)까지 대관령, 춘천, 강릉의 SFE/P는 각각 0.92, 0.52, 0.67로 나타났다.

겨울철 동안 월별 강수량 및 강설량의 43년 평균값을 살펴 보면, 세 지점의 11월 강수량은 겨울철 총강수량 대비 27~30%로 가장 많았으며, 3월 강수량은 약 20%, 12월, 1월, 2월 강수량은 각 달마다 약 12~19% 정도였다. 전반적으로 강수는 기온이 더 높은 달에 더 많은 양상을 보였다. 이는 겨울철 북반구 40도 고위도에서 기온과 강수는 양의 상관관을 보이고, 이러한 지역은 기온에 따라 대기 중 습윤의 양이 결정되는 Clau-

sius-Clapeyron(C-C) 방정식이 중요한 역할을 한다는 Trenberth (2011)의 결과와 상응한다. 대관령과 강릉은 12월 기온이 1월 보다 높지만 12월 강수량이 1월 평균 총강수량보다 적게 나타나, 영동 지역에 위치한 이 두 지점은 C-C 효과 이외의 대기 중 습윤을 조절하는 다른 인자들이 있음을 알 수 있다.

월별 평균 강수량에 비해 강설량은 지점마다 매우 다른 양상을 보였다. 춘천 지점의 강설량은 비록 다른 두 지점에 비해 매우 적은 양이나, 기온이 제일 낮은 1월에 가장 많은 강설량을 보였고, 겨울철 총 강설량의 약 30% 차지하였다. 영동 지역에 위치한 두 지점에서는 평균기온이 가장 낮은 달인 1월

강설량에 상응하는 강설이 2월과 3월에도 나타났다. 특히 대관령에서 3월 강설량이 큰 이유로서, 하루 중 비와 눈이 섞인 상태로 내리더라도 강설로 산정되기 때문인 것으로 사료된다.

43년 평균 월별 SFE/P를 살펴보면, 대관령에서 1월과 2월에는 0.9 이상으로 대부분의 강수량은 강설량에 의해 결정되었으며, 0.23인 11월을 제외하고는 모든 달에서 0.8 이상을 보였다. 그러나 영서 내륙에 위치한 춘천에서 1월에 SFE/P가 0.71로 나타났으나, 12월과 2월은 0.45로서 강수량의 절반은 강우 형태로 나타났고, 11월과 3월에는 각각 0.04와 0.15로 강설량은 매우 적었다. 영동 해안에 위치한 강릉에서는 1월과 2월에 0.81과 0.70으로 비교적 강수 대비 강설이 많았던 반면에, 11월에는 0.05로, 11월에는 0.05로 강수량에 대해 강설량이 차지하는 비율이 5%로 매우 적었는데, 눈이 내린 횟수는 43년 중 9번에 불과했다. 12월과 3월에는 0.46과 0.42로 강수량의 절반 정도가 눈으로 내린 것으로 평가되었다.

3.2 변화 추세

대관령, 춘천, 강릉 지점에서 월별 및 겨울철 P, SFE, SFE/P의 43년간 장기적인 변화 추세를 Fig. 3에 나타내었으며, 95% 신뢰수준에서 각 시계열 변화 추세의 통계적 유의성을 평가하였다. 겨울철 전체 P, SFE, SFE/P는 통계적으로 유의하지는 않지만, 영동지역인 대관령과 강릉에서는 감소하였고, 영서지역인 춘천에서는 증가하였다.

먼저 강수량 변화 경향을 살펴보면, 대관령 지점에서 겨울철 강수량 감소는 크지 않았으나, 주로 11월, 12월, 2월 강수량 감소가 주요 영향인 것으로 나타났다. 강릉 지점에서는 비록 11월에 강수량 증가가 나타났으나, 12월과 2월에 더 큰 폭의 감소와 함께 대부분 달에서 감소하는 경향을 보여서 전반적으로 겨울철 강수량이 감소하는 결과를 나타내었다. 춘천 지점에서는 다른 지점과는 달리 겨울철 강수량이 증가하였으며, 이 증가의 대부분은 11월 강수량 증가에 따른 것으로 평가되었다.

세 지점의 겨울철 강설량 변화 추세 또한 겨울철 강수량과 유사한 변화 추세를 보였으나, 월강설량 변화 추세는 월강수량과 다른 양상을 보여주었다. 대관령에서 11월 강수량이 감소하였던 반면에, 11월 강설량은 증가하는 양상을 보였다. 그러나 11월 강설량은 겨울철 강설량의 8.9% 정도를 차지하는 적은 양이므로, 11월 이외 월강설량은 감소하여 겨울철 전체 강설량이 감소하는 결과를 가져왔다. 춘천 지점에서는 12월과 3월에 강설량 증가가 나타났으며, 특히 겨울철 총강설량의 24% 차지하는 12월 강설량이 통계적으로 유의한 증가 추세를

를 나타내었다. 강릉 지점에서는 통계적으로 유의하지는 않지만, 겨울철 전 달에 걸쳐 감소하는 변화추세를 보였다.

Fig. 3a에서 강수량에 대한 강설량의 비는 대부분 강수량의 감소나 강설량의 감소에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 춘천 지점에서는 12월에 강설량의 증가로 인하여 통계적으로 유의한 증가 경향을 보였다. 대관령 지점에서는 2월과 3월 SFE/P가 통계적으로 유의한 감소 경향을 보였는데, 2월에는 강수량 감소보다 더 큰 강설량 감소, 3월에는 강수량 증가와 강설량 감소에 따른 것으로, 전반적으로 강설량 감소가 큰 영향을 준 것으로 보인다.

SFE/P와 P 또는 SFE 사이의 관계를 보다 객관화하기 위해서 상관분석을 수행하였다. 그 결과, 대관령에서 겨울철 SFE/P는 P와는 상관성이 나타나지 않았으나, SFE와는 0.5로 95% 신뢰수준에서 유의한 상관성을 보여 대관령에서 SFE/P의 변동은 강수량 변동보다는 강설량 변동에 크게 의존함을 보여 주었다. 특히 각 달에 대한 상관성 분석으로부터 11월, 12월, 3월 SFE/P 변동은 강설량 변동과 유의한 상관관계를 보여, 대관령에서는 계절변이 기간인 달에 강수량보다는 강설량 변동이 SFE/P 변동에 영향을 주는 것으로 나타났다. 춘천 지점에서 대관령과 유사하게 겨울철 SFE/P는 P보다는 SFE 변동에 크게 영향을 받았으며, 특히 11월, 12월, 3월에 상관성이 매우 높게 나타났다. 강릉 지점에서도 앞의 두 지점과 마찬가지로 SFE/P는 강설량의 변동에 크게 좌우되며, 비록 11월과 3월에 가장 높은 상관성을 보였지만, 앞의 두 지점과는 달리 겨울철 전 달에 대해서 유의한 양의 상관성을 보였다.

이 기간 동안 세 지점에서의 기온 변화추세를 참고로 살펴 보게 되면(Fig. 4), 대관령에서 겨울철 최고·최저 기온이 각각 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C/decade}^{-1}$, $0.3\text{ }^{\circ}\text{C/decade}^{-1}$ 비율로 통계적으로 유의한 증가 경향을 보였다. 각 달의 최고·최저 기온 모두 상승하였으나, 2월, 3월 최고 기온 및 11월, 3월 최저기온이 통계적으로 유의한 증가 추세를 나타냈으며, 2월 최고기온이 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C/decade}$ 로 가장 큰 증가율을 보였다. 춘천 지점에서는 겨울철과 대부분 달의 최고·최저 기온이 증가하는 경향을 보였으나, 2월 최고기온만이 통계적으로 유의한 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C/decade}$ 증가를 보였다. 이 지점에서 최고·최저 기온 모두 12월에 감소하는 경향은 Fig. 3b에서의 12월 SFE 증가 추세와 연관된 것으로 보인다. 강릉에서는 겨울철 최고·최저 기온이 각각 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C/decade}$, $0.4\text{ }^{\circ}\text{C/decade}$ 비율로 통계적으로 유의한 증가 경향을 보였다. 각 달의 최고·최저 기온 변화율을 살펴보면, 12월 최고기온은 감소하고, 최저기온은 변화가 없었던 것을 제외하고는 거의 모든 달에서 최고·최저 기온이 증가하였으며, 11월 최저기온 및 2월과 3월 최고 및 최저 기온이 통계적으로 유의한 증가를

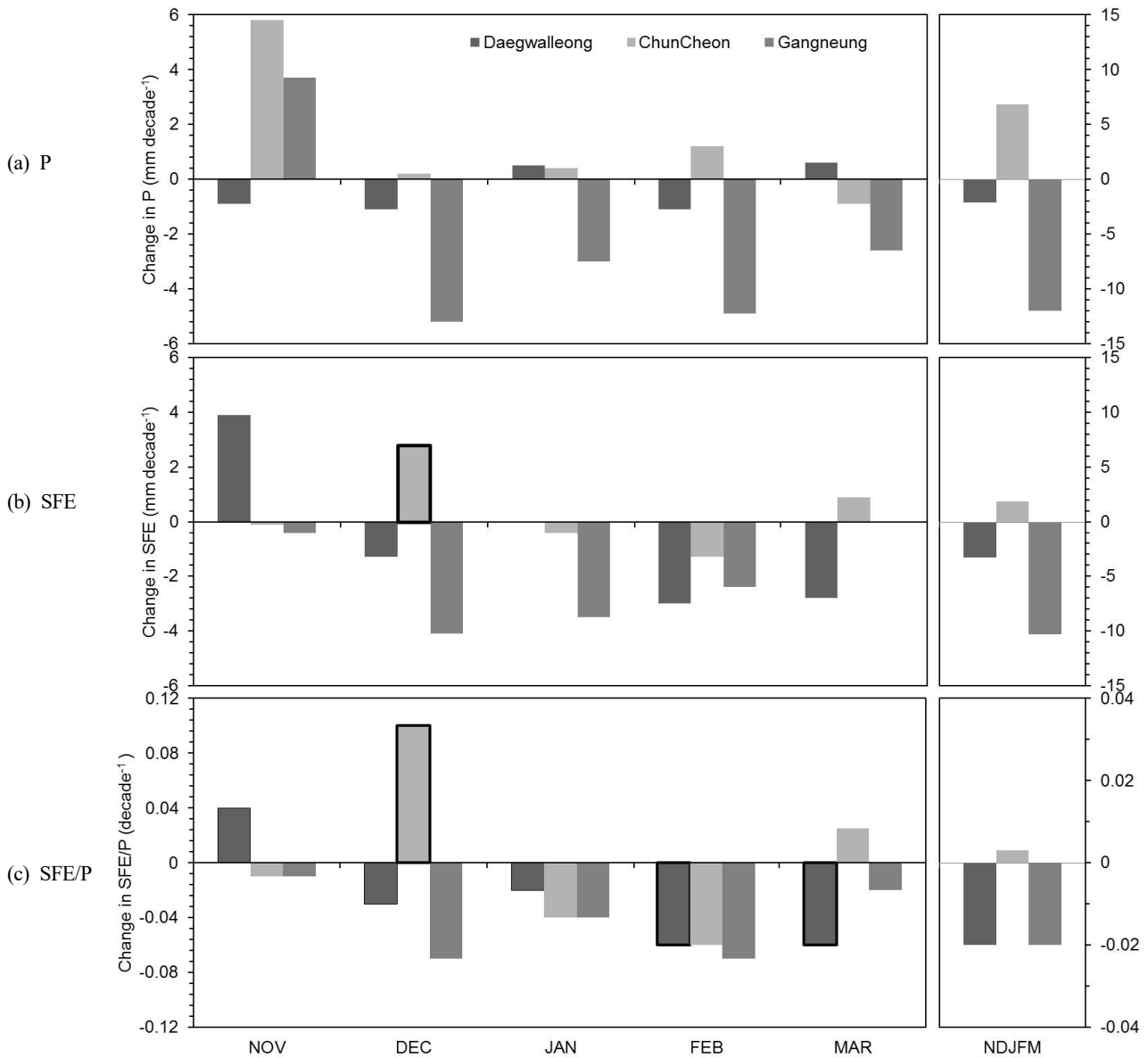


Fig. 3. Trends in monthly (NOV, DEC, JAN, FEB, MAR) and winter (NDJFM) (a) P, (b) SFE, and (c) SFE/P for the period 1973/74 ~ 2015/16 in Daegwallyeong (dark grey bar), Chuncheon (grey bar), and Gangneung (medium dark grey bar). Outlined bars indicate trends that are significant at the 95% confidence level.

보였다. 또한 이슬점 온도의 변화 추세를 살펴보면(Fig. 4c), 대기의 습윤 상태와 연관된 겨울철 이슬점 온도는 세 지점에서 감소하는 것으로 나타났으며, 이러한 감소 추세는 강릉 지점의 12월, 3월 및 겨울철 이슬점 온도가 95% 신뢰수준에서 유의하였다. 이슬점 온도의 감소 경향은 대기 중 습윤 상태의 감소와 관련되며, 이는 겨울철 강수량 감소와 연관된 것으로 판단된다.

대관령, 춘천, 강릉 지점의 43년간 기후변화 경향을 요약하면, 이 세 지점의 겨울철 기온은 통계적으로 유의하게 상승하는 경향을 보인 반면에, 대관령과 강릉에서 P, SFE, SFE/P는 통계적으로 유의하지는 않지만 감소하는 경향을 보였다. 특히 설상경기가 개최되는 평창지역 관측지점인 대관령에서 올림픽 및 패럴림픽이 개최되는 2월과 3월 최고·최저 기온 증가는 눈이 올 가능성 감소, 눈이 빨리 녹을 가능성 증가 및 눈보

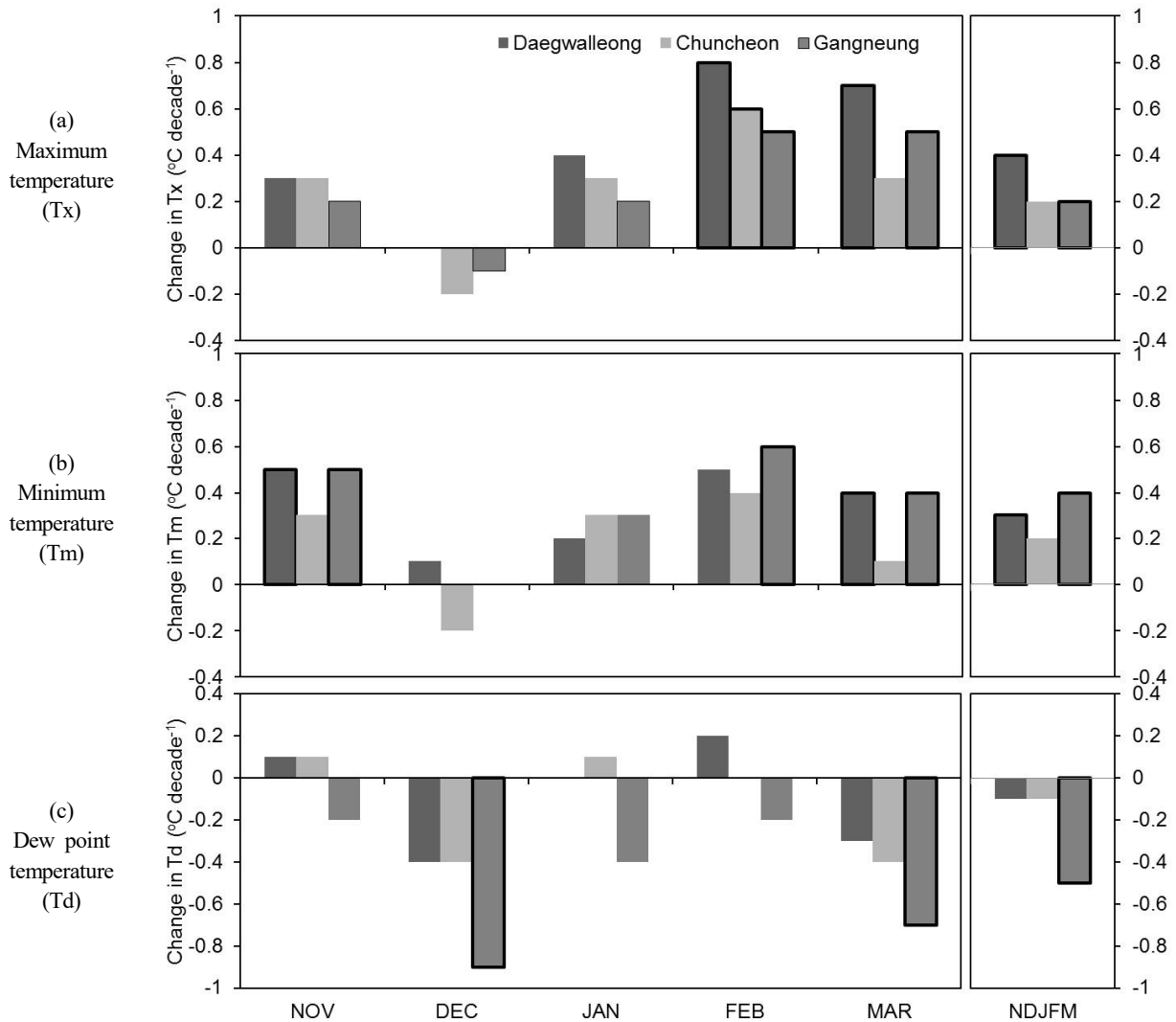


Fig. 4. Same as in Fig. 3 except for (a) maximum temperature (Tx), (b) minimum temperature (Tm), and (c) dew point temperature (Td). Outlined bars indicate trends that are significant at the 95% confidence level.

다 비가 올 가능성의 증가를 가져올 수 있으며, 이는 2월과 3월에 SFE/P의 통계적으로 유의한 감소로 설명될 수 있을 것이다.

3.3 강수와 기온과의 연관성

최근 대관령과 강릉의 겨울철 기온은 상승하고, 겨울철 강수량은 감소하는 추세를 보이고 있으나, 기온 변화 및 변동성은 겨울철 강수 변화 및 변동성뿐만 아니라, 형태에 영향을 줄 수 있다. 강수의 기온에 대한 의존성을 살펴보기 위해서 겨울철 P, SFE, SFE/P와 최고(Tw), 최저(Tm), 이슬점 온도(Td)의 시계열과의 상관분석을 수행하였다. Fig. 5에 지점별 P, SFE,

SFE/P와 이슬점 온도(y축), 최저기온(x축)과의 상관계수를 나타내었으며, 상관계수가 0.3 이상이거나 -0.3 이하이면 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의하다.

이슬점 온도가 높을수록 대기의 습윤도는 높아지는데, 춘천의 12월과 1월 P를 제외하고는 세 지점 대부분의 P와 유의한 양의 상관관계를 보였다. 이슬점 온도는 대관령과 강릉지점에서 1월, 2월, 겨울철 SFE와 유의한 양의 상관을 보였고, 춘천 지점에서는 11월 SFE 사이에만 유의한 상관성을 보여주었다. 대관령과 강릉에서 SFE/P가 SFE와 상관성이 높고, P와는 상관성이 낮은 결과와 유사하게 대관령에서의 11월 SFE/P를 제외하고는 이슬점 온도와 유의한 상관성을 보이지 않았

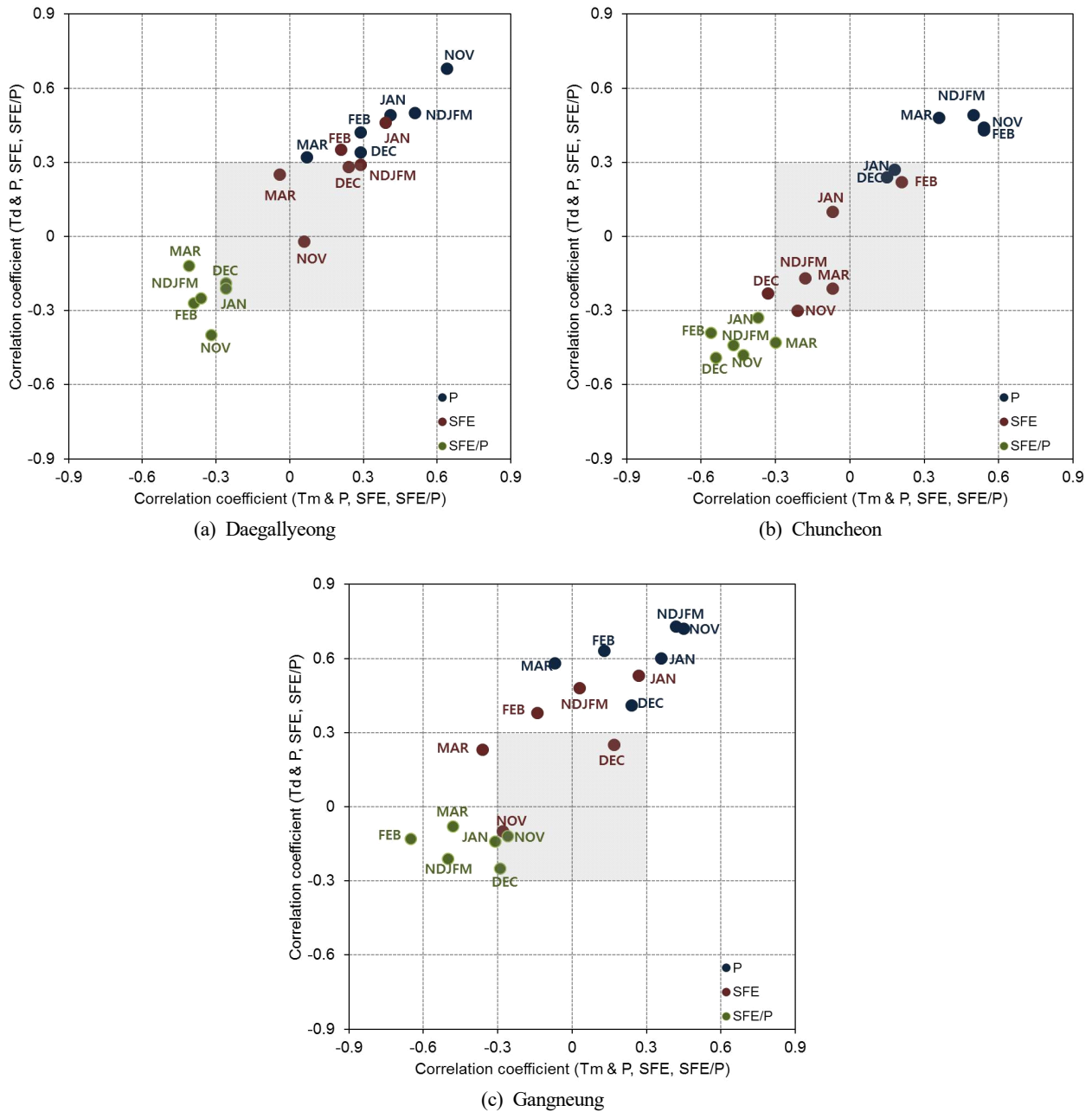


Fig. 5. Correlation Coefficients between monthly (NOV, DEC, JAN, FEB, MAR) and winter (NDJFM) P, SFE, SFE/P, and minimum (Tm, x-axis) and dewpoint (Td, y-axis) temperature in (a) Daegallyeong, (b) Chuncheon, and (c) Gangneung. The correlation coefficient is ± 0.3 at the 95% confidence level.

다. 그러나 SFE/P가 P와 상관성이 높았던 춘천에서는 SFE/P 또한 모든 달에서 대기 중 습윤과 통계적으로 유의한 음의 상관성을 보여, 대기 중 습윤도가 높을수록 강수형태가 강설보다는 강수일 가능성이 높다는 것을 보여주었다.

최저기온과 강수 변수와의 상관분석으로부터 대관령, 춘

천, 강릉 겨울철 P와 최저기온과의 상관계수는 각각 0.51, 0.5, 0.42로 통계적으로 유의한 양의 상관성을 보여, 최저기온의 높으면 강수량도 많은 변동성을 보였다. 즉, 겨울철 장기적인 변화 경향성은 기온 상승과 강수량 감소 추세로 나타나지만, 두 변수의 변동성은 양의 상관성을 보이며, 이는 기온이 상대

적으로 높을 때 강수도 상대적으로 많아지는 변동 특성을 나타낸다고 볼 수 있다. 특히 세 지점 모두 11월에 강수량과 최저기온이 통계적으로 유의한 양의 상관성을 보이므로, 11월 최저기온의 증가 추세가 지속된다면, 11월 강수량이 증가 추세인 춘천과 강릉에서는 더욱더 강수가 많아질 것이고, 감소 추세인 대관령에서는 감소 추세가 완화될 가능성이 커질 것이다.

강수량과는 달리 강설량은 최저기온과의 상관성이 높지 않거나 상관성이 있더라도 월에 따라 상의한 결과를 보여주는 데, 이는 눈의 형성에 대한 기온의 영향과 관련된 것으로 사료된다. 기온이 0°C 이하이면 강수가 눈의 형태를 가질 수 있으므로, 평균적인 기온이 영상인 달에서는 기온과 강설의 음의 관계가 성립될 가능성이 높으며, 기온이 0°C 이하로 낮아질수록 대기 중 수증기 함유 능력이 떨어져 눈이 더 많이 오지는 않기 때문에, 평균적인 기온이 영하인 경우가 많았던 달에는 기온과 강설 사이에 양의 관계가 성립될 가능성이 높아질 것이다. 즉, 대관령 지점에서 1월 SFE와 최저기온의 통계적으로 유의한 양의 상관성은 대관령 지점 1월 최저기온의 43년 평균값이 -12.7°C 이므로, 이보다 기온이 높았을 때 눈이 더 많이 왔음을 의미하며, 강릉 지점에서 3월 강설량과 최저기온과의 통계적으로 유의한 음의 상관성은, 강릉 지점 3월 최저기온의 43년 평균값이 2.0°C 이므로, 이보다 기온이 더 낮았을 때 눈이 왔음을 보여주고 있다. 최저기온은 P, SEF보다는 SFE/P에 크게 영향을 미치는데, 일부 달을 제외하고는 세 지점에서 최저기온과 SFE/P는 통계적으로 유의한 음의 상관성을 보여, 최저기온이 올라갈수록 SFE/P는 감소하여 강수량 중에 강설량이 차지하는 비중은 감소하였다.

강수 형태와 기온과의 연관성을 보다 자세히 살펴보기 위해서, 43년 중에서 겨울철 또는 각 달에 대해 0.1 mm 일강수(P)가 존재한 습윤한 날, P 중에서 강수 형태가 눈이었을 때(S)와 비였을 때(R), 그리고 일강수가 존재하지 않았던 건조한 날(D)에 해당하는 일 최고 기온(Tx)과 최저기온(Tm)의 평균값을 산출하였다. Fig. 6에서 가로축은 총 분석기간 43년 평균 최고 기온(Tx_a) 및 최저 기온(Tm_a)이고, 세로축은 예를 들어 43년 중 강수가 있었던 날의 최고 기온(Tx_P)과 최저기온(Tm_P)의 평균값으로부터 각각 Tx_a, Tm_a를 뺀 차를 나타내고 있다.

대관령 지점에서 강수가 있었던 날에 최고(Tx_P)·최저기온(Tm_P)은 겨울철 또는 각 달의 Tx_a, Tm_a가 영하인 경우에는 Tx_a, Tm_a보다 더 높았고, 영상인 경우에는 더 낮았으며, 건조한 날에는 반대로 나타났다. 그러나 강수형태가 비인 경우에는 겨울철 또는 각 달의 Tx_R, Tm_R은 각각 Tx_a,

Tm_a보다 높았다. 강수 형태가 눈인 경우에 겨울철 Tm_S는 Tm_a와 차이가 없었으나, 겨울철 Tm_a보다 낮은 Tm_a 값을 보이는 달(JAN, FEB, DEC)에 눈이 온 경우는 Tm_a가 낮을수록 Tm_S는 더 높았으며, 겨울철 Tm_a보다 높은 Tm_a 값을 보이는 달(NOV, MAR)에 눈이 온 경우는 Tm_a가 낮을수록 Tm_S는 더 낮았다. 대관령에서 나타나는 이러한 양상은 일부 차이는 존재하지만, 다른 두 지점 춘천과 강릉에서도 유사한 경향을 보이고 있다. 따라서 지구 온난화는 강수 증가를 가져올 수 있으며, 눈이 올 수 있는 임계값에 어떤 영향을 주느냐에 따라 강설 변화가 나타날 것이다.

3.4 극한 강수 사상의 변화

이 연구에서는 평균장 변화뿐만 아니라, 극한 강수 사상의 변화를 탐지하기 위해 세 지점의 겨울철과 겨울 기간 중 각 달의 일 P와 SFE 자료를 이용하여 강수 극한 사상의 변화를 살펴보았다. 총 43년 분석 기간을 상반기 21년(1973/74~1993/94)(PI)과 하반기 21년(1995/96~2015/16)(PII)으로 나누었으며, PI와 PII 기간에 대해서 매년 겨울철 및 각 달의 일강수량과 일강설량 중에서 최대값을 추출하였다. 이러한 일최대 강수량 또는 강설량 시계열에 대해서 L-moment 기법을 적용하여 GEV 분포를 추정하였고, 이로부터 PI와 PII 기간의 20년 재현값을 Fig. 7에 나타내었다. Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정결과 춘천과 강릉의 11월 일최대 강설량 분포를 제외하고는 산출된 GEV 분포는 적합한 것으로 평가되었다.

대관령에서는 겨울철 일최대 강수량의 20년 재현값이 PI 기간에 100.9 mm이었으나, PII 기간에 71.0 mm로 29.6% 감소하였다. 또한 월별 일최대 강수량의 20년 재현값은 모두 감소했으며 1월의 감소폭이 4.2%로 가장 작았고, 3월의 감소폭이 37.2%로 가장 컸다. 겨울철 일최대 강설량은 PI 기간에 73.8 mm에서 PII 기간에 69.2 mm로 20년 재현값은 6.2% 감소하여 극한 강설량이 줄어드는 경향을 보였다. 이러한 양상은 대부분 달에서 나타났으나, 유일하게 11월에 20년 재현값이 PI 기간에 비해 PII 기간에 증가하였다.

춘천에서는 겨울철 일최대 강수량의 PII 기간의 20년 재현값은 PI 기간에 비해 40.0% 감소한 반면에, 일최대 강설량은 9.3% 증가하였다. 월별 일최대 강수량의 20년 재현값 변화를 살펴보면, PII 기간에 대해 11월, 12월, 3월의 일최대 강수량의 20년 재현값은 PI 기간에 비해 줄어드는 반면에, 1월과 2월에는 증가하였다. 겨울철 일최대 강설량의 20년 재현값의 증가는 12월, 1월, 3월의 20년 재현값 증가에 따른 것이며, 특히 12월 재현값이 PI 기간에 비해 PII 기간에 30.1%가 증가하였고, 이는 Fig. 3의 춘천 지점의 12월 강설량의 유의한 증가와

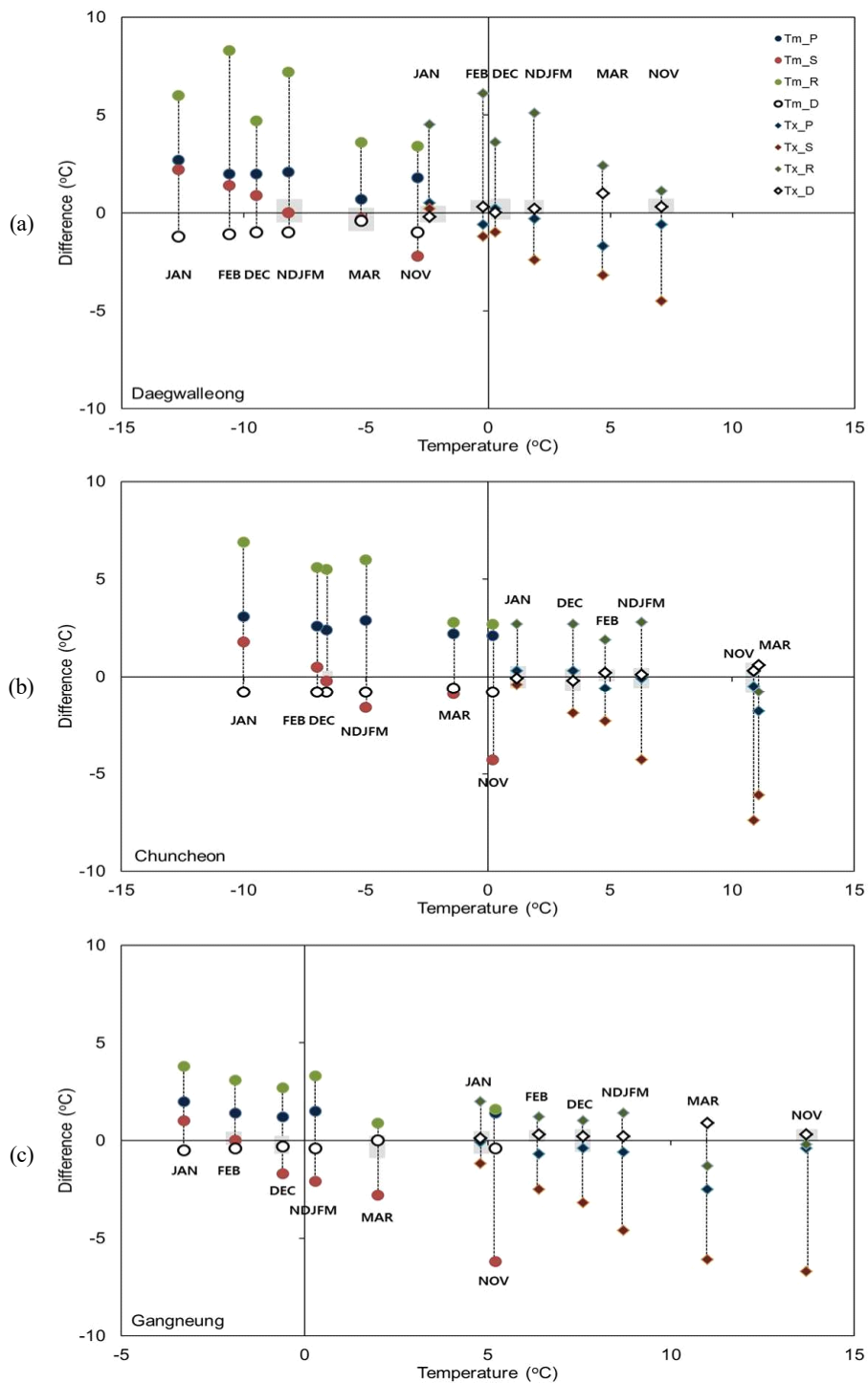


Fig. 6. Differences between averaged daily minimum temperature (○) from wet days (precipitation ≥ 0.1 mm, Tm_P), dry days (precipitation < 0.1 mm, Tm_D), days with rainfall ≥ 0.1 mm (Tm_R), days with snowfall ≥ 0.1 mm (Tm_R), and averaged daily minimum temperature for the period 1973/74~2015/16. Differences in daily maximum temperature (◇) are denoted in the same manners as those in minimum temperature. Grey boxes denote that difference values are not statistically significant at 95% confidence level.

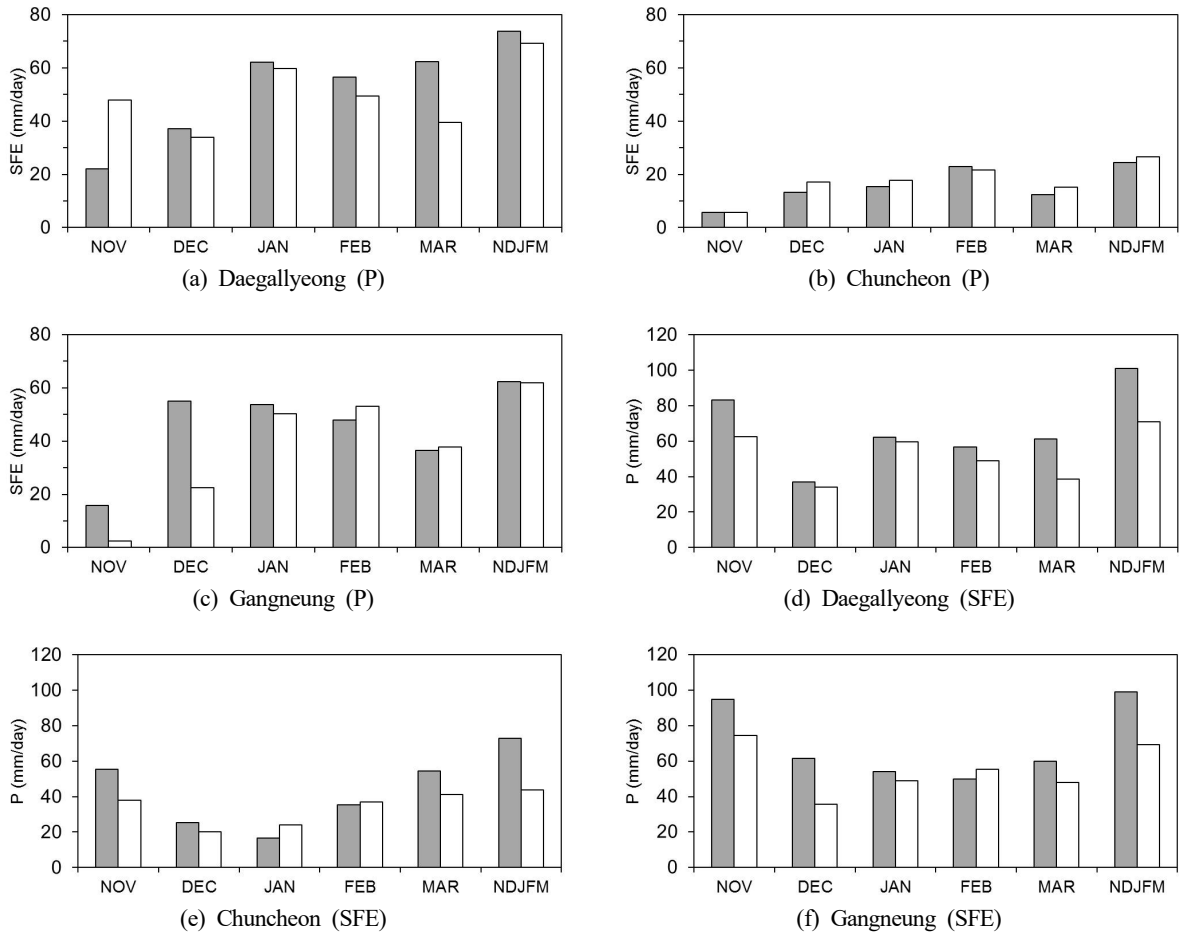


Fig. 7. 20-year return levels estimates based on 1973/74 ~ 1993/94 (filled bars) and 1995/96 ~ 2015/16 (empty bar).

관련된 것으로 보인다.

강릉 관측 지점의 PII 기간 겨울철 일최대 강수량의 20년 재현값은 PI 기간에 비해 30.2% 감소하였고, 일최대 강설량은 0.6% 감소하였다. 겨울철 일최대 강수량의 20년 재현값의 감소는 12월에 가장 크게 나타났으며, 2월에는 10.7% 증가하는 양상을 보였다. 강릉의 2월 평균 강설량의 감소 추세 속에서 일최대 강설량의 20년 재현값은 증가하므로 극한 사상이 더 커지고, 변동성도 커졌음을 알 수 있다.

앞에서 제시된 43년 분석 기간 중 PI, PII 기간의 극한 강수 및 강설 사상의 변화에 대한 이해 증진을 위하여 두 기간에 대해서 겨울철동안 일최고기온 및 최저기온의 일변화를 살펴 보았다. Fig. 8에서 세 지점 모두 11월과 1월 중순 이후로 일최고 및 최저 기온이 PI 기간보다 PII 기간에 더 높았으며, 특히 최고기온의 증가가 더 두드러져서 일교차가 1월 중순 이후 더 커졌다. 지점마다 차이는 있으나, 12월부터 1월 중순까지는 PI 기간과 PII 기간의 기온 차는 크지 않고, 감소 또는 증

가의 형태를 나타내었다. 산악지역에 위치한 대관령에서는 겨울철동안 두 기간 모두 11월 초 며칠을 제외하고는 최저기온이 0°C 이하였던 반면에, 최고 기온은 12월 중순부터 0°C 이하로 떨어진 다음 PI 기간에는 2월말까지 영하권을 유지하였으나, PII 기간에는 2월 중순에 0°C 이상으로 상승하여, 올림픽 기간 중 눈이 내리더라도 더 빨리 녹을 확률이 높아졌음을 알 수 있다. 강원 영서 내륙에 위치한 춘천에서 최저기온이 11월 중순에 영하권으로 내려갔다가 거의 3월말까지 유지됨을 알 수 있으며, 최고 기온은 PI, PII 기간에 영상권 유지하였다. 특히 PII 기간 12월부터 1월 중순까지의 최저기온의 감소는 12월 춘천 강설량 증가 추세와 연관된 것으로 사료된다. 동해안에 위치한 강릉 지점에서 최저기온은 12월 중순에 최저기온이 영하권으로 내려갔으며, PI 기간에는 3월 초순에 0°C 이상이 되었으나, PII 기간에는 2월말에 0°C 이상으로 바뀌었다. 이러한 강릉의 겨울철 기온 증가는 다른 지점에 비해 더 큰 강수량 및 강설량 감소와 연관된다.

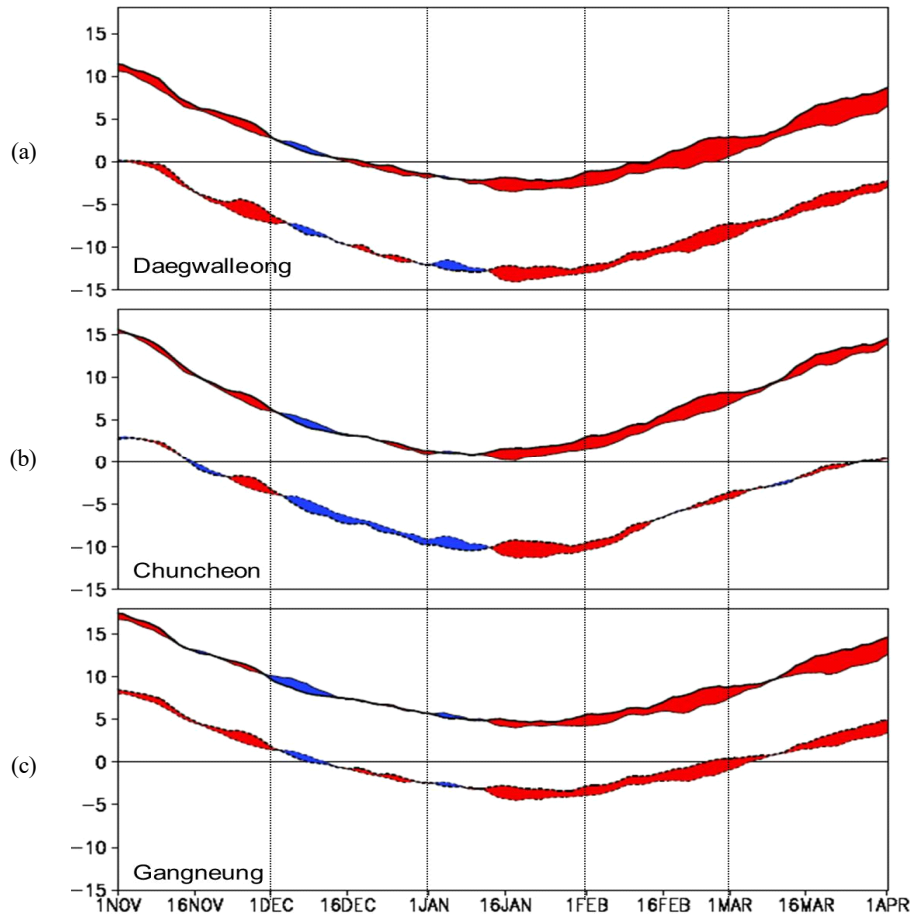


Fig. 8. The average of 11-day running mean daily maximum (solid lines) and minimum (dotted lines) temperature (Unit: °C) from 1 November (NOV) through 31 March (MAR) for two 21-year periods from 1973/74 to 1993/94 (PI) (thin lines) and from 1995/96 to 2015/16 (PII) (thick lines). The shaded areas show differences between the two periods (PII minus PI).

4. 요약 및 토의

2018년 2월과 3월에 개최되는 평창 동계올림픽과 패럴림픽에서 양질의 눈 확보를 통한 성공적 개최를 위해서는 기후변화로 인한 기상 위험 요소를 대비하는 것이 중요하다. 이를 위해서 올림픽 개최지인 평창에 인접한 대관령뿐만 아니라, 춘천, 강릉 지점의 43년간(1973/74~2015/16) 겨울철 P, SFE, SFE/P의 변화를 살펴보았으며, 요약하면 다음과 같다.

- 세 지점의 겨울철 P, SFE, SFE/P의 변동성은 전반적으로 크며, 대관령 P와 강릉 P와의 상관계수가 0.80이었으나, 춘천 P와는 0.54로서, 태백산맥 동쪽에 위치한 대관령과 강릉의 겨울철 강수량 변동성의 80%는 유사한 메커니즘에 의해서 설명될 수 있을 것이다.
- 대관령 겨울철 SFE는 강릉 SFE와의 상관계수가 0.66으

로서 P보다는 낮으나 95% 신뢰도에서 유의하며, 영서에 위치한 춘천과는 0.38로 영서 지방에서의 SFE 변화는 영동 지역과 다른 변동성을 보였다.

- 43년 평균 겨울철 P는 강릉에서 304.9 mm로 가장 많았고, SFE는 산악지대에 위치한 대관령에서 201.1 mm로 가장 많았으며, 춘천의 SFE는 대관령의 1/5 수준이었다.
- 43년 평균 SFE/P을 살펴보면, 대관령에서 겨울철에 내린 강수량 중에서 71%가 강설에 의한 것이며, 강릉에서는 44%, 춘천에서는 28%만 강설로 분류되었다. 산악지대에 위치한 대관령에서는 11월에 SFE/P가 0.23인 경우를 제외하고는 대부분 달에서 0.80 이상으로 겨울철에 비교적 강우보다는 강설 형태를 보였다. 그러나 춘천과 강릉에서 11월 0.04로 0.05로 대부분 강우 형태로 강수가 나타났다. 이는 43년 평균 일최저 기온이 영하권을 유지했던 대관령

- 에서와는 달리 춘천과 강릉에서는 11월 상순에 일 최저 기온이 영상을 기록한 것과 관련이 있을 것으로 사료된다.
- 43년 변화 경향 분석으로부터, 겨울철 P, SFE, SFE/P는 대관령과 강릉에서 감소하였고, 춘천에서 증가하였으나, 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의하지는 않았다. 그러나 SFE/P의 변동성은 주로 P 변동보다는 SFE 변동성과 관련되었다. 월별 변화를 살펴보면, 춘천의 12월 SFE와 SFE/P의 증가 추세와 대관령 2월과 3월 SFE/P의 감소 추세가 통계적으로 유의한 결과를 나타내었다.
 - 대관령에서 2월의 SFE/P의 감소는 P 감소보다 더 큰 SFE 감소, 3월의 SFE/P의 감소는 P 증가와 SFE 감소에 따른 것이며, 춘천에서는 SFE/P의 증가는 SFE 증가에 따른 것으로 보인다. 춘천에서 12월 SFE 증가는 통계적으로 유의하지는 않으나, 12월 최고 기온 및 최저기온 감소 추세와 관련된 것으로 사료된다.
 - 강수와 기온 변동성과의 관련성을 상관분석을 통하여 살펴보고, 겨울철 기온이 높을 때 겨울철 P는 많아지지만, SFE는 춘천 12월 SFE, 강릉의 3월 SFE가 기온과 음의 상관성을 보였다. 특히 겨울철 기온은 SFE/P의 변동성과 통계적으로 유의한 음의 상관성을 보여, 기온이 높을수록 강수 형태는 강설이 아닌 강우 형태를 가질 수 있다.
 - 분석기간 중에 겨울철 또는 각 달의 43년 평균 최고(Tx_a) · 최저(Tm_a) 기온이 영하인 경우에는 강수가 있었던 날의 최고 · 최저기온은 Tx_a, Tm_a보다 더 높았고, 영상인 경우에는 더 낮았으며, 건조한 날 기온은 반대로 나타났다. 강수가 강우형태일 때 기온은 43년 평균값보다 높았고, 강설일 경우에는 특정 기온을 전후로 평년값보다 높거나 낮아서, 강설 현상이 존재하기 위해서는 기온이 일정한 범위 내에 존재해야 함을 보여주었다.
 - PI, PII 기간의 일최대 강수량과 강설량의 20년 재현값을 비교한 결과, 세 지점에서 겨울철 일최대 강수량의 20년 재현값은 감소하였으며, 일최대 강설량도 대관령과 강릉에서 감소하였다.
 - 산악 경기가 열릴 평창 클러스터 인근 관측 지점인 대관령에서 PI 대비 PII 최저 · 최고기온이 1월 중순부터 양의 값으로 기온 증가가 뚜렷하지만, 여전히 두 기간의 최저기온이 겨울철 내내 영하권으로 눈이 올 가능성은 존재한다. 그러나 최고기온은 PI 기간에 2월말까지 영하권이었으나, PII 기간인 2월 중순에 영상권으로 변함에 따라 올림픽 기간 중에 눈이 내리더라도 더 빨리 녹을 확률이 높아졌음을 알 수 있다.
- 전반적으로 강원 지역에서 통계적으로 유의한 기온 상승

추세 속에서 겨울철 강수량 및 강설량은 통계적으로 유의하지는 않으나, 감소 추세를 보였다. 이러한 장기적인 추세속에서도 SFE/P의 변동성은 기온에 크게 의존하므로, 향후 지구 온난화가 지속된다면, 겨울철 강수형태는 강설보다는 강우 형태일 확률이 더 높아질 것으로 파악되었다.

이 연구에서는 최근 기후변화 속에서 동계올림픽이 2018년 평창에서 개최됨에 따라, 동계올림픽 운영에 매우 중요한 강설 확보 및 강수 형태에 대한 정보를 얻기 위해서 이 지역의 기온 변화와 함께 강수량, 강설량, 강수량에 대한 강설량의 비의 변화 등을 살펴보았다. 그러나 지점 분석에서 더 나아가 장기적이고 균질적인 관측자료 확보로, 강원지역에서 기후변화에 따른 수문요소의 공간특성의 변화를 살펴보고자 할 것이다. 또한 산악지역 눈구름 발달에 대한 미세규모 강설물리과정 이해 증진을 바탕으로 지구 온난화가 강원 지역의 강설 및 강수 메커니즘에 어떤 영향을 주는지에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

사 사

세심한 심사를 해 주신 심사위원님께 감사드립니다. 이 연구는 수치모델링센터 주요 사업 ‘기상업무지원기술개발연구(NIMS-2016-3100)’의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baek H-J, Kim M-K, Kwon W-T. 2016. Observed short- and long- term changes in summer precipitation over South Korea and their links with large-scale circulation anomalies. *International Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.4753
- Cho K-H, Cho Y-J, Kwon T-Y. 2004. Characteristics of air mass related with precipitation events in Yeongdong region. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 40: 381-393.
- Cho K-H, Kwon T-Y. 2012. Orographic and ocean effects associated with a heavy snowfall event over Yongdong region. *Atmosphere* 22:57-71.
- Cohen J, Ue H, Jones J. 2015. Trends and variability in rain-on-snow events. *Geophysical Research Letters* 42:7115-7122. doi: 10.1002/2015GL065320
- Chung K-B, Kim J-Y, Kwon T-Y. 2004. Characteristics of lower-tropospheric wind related with winter precipitation

- in the Yeongdong region. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 40:369-380.
- Daegwallyeong Weather Station. 2007. Report on comparative observation due to relocation of Daegwallyeong weather station relocation. Daegwallyeong Weather Station, pp 156.
- Huntington TG, Hodgkins GA, Keim BD, Dudley RW. 2003. Changes in the proportion of precipitation occurring as snow in New England. *Journal of Climate* 17:2626-2636.
- IPCC. 2013. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Knowles N, Dettinger MD, Cayan DR. 2006. Trends in snowfall versus rainfall in the Western United States. *Journal of Climate* 19:4545-4559.
- Korea Meteorological Administration. 2013. Operational manual of CCTV for detection of snow and results of comparative snow observation using CCTV. Korea Meteorological Administration, pp 50.
- Kunkel KE, Palecki MA, Ensor L, Easterling D, Hubbard KG, Robinson D, Redmond K. 2009. Trends in twentieth-century US extreme snowfall seasons. *Journal of Climate* 22:6204-6216.
- Kwon T-Y, Cho Y-J, Seo D-H, Choi M-G, Han S-O. 2014. Synoptic environment associated with extreme heavy snowfall events in the Yeongdong region. *Atmosphere* 24: 343-364.
- Lee J, Baek H-J, Hyun Y-K, Cho CH. 2011. Observed-based analysis of climate change using meteorological data of Gangneung. *Climate Change Research* 2:133-141.
- McCabe GJ, Clark MP, Hay LE. 2007. Rain-on-snow events in the western United States. *Bull Am Meteorol Soc* 88: 319-328.
- Mekis É, Vincent LA. 2011. An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean* 49:163-177.
- Min S-K, Son S-W, Seo K-H, Kug S-J, An S-I, Choi Y-S, Jeong J-H, Kim B-M, Kim J-W, Kim Y-H, Lee M-I. 2015. Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: A review. *Asia-Pac J Atmos Sci* 51:103-121. doi: 10.1007/s13143-015-0066-5
- Rebetez M. 1996. Seasonal relationship between temperature, precipitation and snow cover in a mountainous region. *Theor Appl Climatol* 54:99-106.
- Rutty M, Scott D, Seiger R, Johnson P. 2015. Weather risk management at the Olympic Winter Games. *Current Issues in Tourism* 18:931-946. doi: 10.1080/13683500.2014.88-7665
- Scherrer SC, Appenzeller C. 2006. Swiss Alpine snow pack variability: Major patterns and links to local climate and large-scale flow. *Clim Res* 32:187-199.
- Scherrer SC, Wüthrich C, Croci-Maspoli M, Weingartner R, Appenzeller C. 2013. Snow variability in the Swiss Alps 1864-2009. *International Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.3653
- Scott D, Steiger R, Rutty M, Johnson P. 2015. The future of the Olympic Winter Games in an era of climate change. *Current Issues in Tourism* 18:913-930. doi: 10.1080/13-683500.2014.887664
- Serquet G, Marty C, Dulex J-P, Rebetez M. 2011. Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophysical Research Letters* 38:L07703. doi: 10.1029/2011GL046976
- Shekar, M, Chand H, Kumar S, Srinivasan K, Ganju A. 2010. Climate change studies in the western Himalaya. *Annals of Glaciology* 51:105-112.
- Song J-A, Lee J-G, Kim Y-J. 2016. The study of correlations between air-sea temperature difference and precipitation between wind and precipitation in the Yeongdong Coastal region in relation to the Siberian High. *Atmosphere* 26:127-140.
- Takeuchi Y, Endo Y, Murakami S. 2008. High correlation between winter precipitation and air temperature in heavy-snowfall areas in Japan. *Annals of Glaciology* 49:7-10.
- Trenberth K. 2011. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research* 47:123-138. doi: 10.3354/cr00953
- Ye H, Yang D, Robinson D. 2008. Winter rain on snow and its association with air temperature in northern Eurasia. *Hydrological Processes* 22:2728-2736.
- Zwiers FW, Kharin VV. 1998. Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO₂ doubling. *J Clim* 11:2200-2222.