

현재와 미래 우리나라 겨울철 강수형태 변화*

최광용** · 권원태***

Current and Future Changes in the Type of Wintertime Precipitation in South Korea*

Gwangyong Choi** and Won-Tae Kwon***

요약 : 본 연구에서는 20세기 후반 관측자료를 분석하여 최근 한반도 겨울철 강수현상에 나타난 변화 양상과 그 원인을 밝히고, 21세기 후반 기후모델(GFDL 2.1) 자료를 바탕으로 미래의 겨울강수 변화추세를 예측해 보고자 한다. 61개 지점 관측자료를 분석한 결과에 따르면, 지난 35년 동안(1973/74~2006/07) 우리나라 겨울철(11~4월) 총 강수량은 변화가 없었지만, 강설량은 약 4.3cm/10년의 비율로 감소하였다. 1980년대 후반 이후 강설일수가 감소하고, 강설강도가 약해지고, 강설계절의 길이가 줄어들면서 설수일율(전체 강수일 수에서 강설일이 차지하는 비율)도 낮아졌다. 이러한 패턴은 겨울철 강수형태가 점차 강설에서 강우의 형태로 바뀌어가고 있음을 보여준다. 이러한 우리나라 겨울철 강수 형태의 변화는 겨울철 양(+)의 북극진동(Arctic Oscillation)에 의해 한반도 주변의 겨울철 기압이 상승함에 따라 나타난 기온상승과 관련되어 있다. 1980년대 후반 이후의 동북아시아 지역의 기압 상승은 한반도 주변의 대기와 해양 온도를 차별적으로 상승시킴으로써 대기안정도 증가에 의한 눈구름 형성 감소와 관련된 대기-해양간 온도경도를 감소시켰다. 모델생산 미래(2081~2100) 기후자료와 20세기 후반(1981~2000) 기후자료 비교 분석 결과, 21세기 말에는 대기 중 온실기체의 양이 증가할수록 온난화가 강화되어 겨울철 강설기간이 더 짧아지고 강설불가능일이 더 증가할 것으로 예상된다.

주요어 : 겨울강수, 설수일율(강설일수 대 강수일수의 비율), 대기-해양 온도경도, 북극진동(AO), 기후모델(GFDL 2.1), 기후변화

Abstract : This study intends to clarify the characteristics and causes of current changes in wintertime precipitation in Korea and to predict the future directions based on surface observational (1973/04~2006/07) and modeled (GFDL 2.1) climate data. Analyses of surface observation data demonstrate that without changes in the total amount of precipitation, snowfall in winter (November~April) has reduced by 4.3cm/decade over the 1973~2007 period. Moreover, the frequency and intensity of snowfall have decreased; the duration of snow season has shortened; and the snow-to-rain day ratio (STDR) has decreased. These patterns indicate that the type of wintertime precipitation has changed from snow to rain in recent decades. The snow-to-rain change in winter is associated with the increases of air temperature (AT) over South Korea. Analyses of synoptic charts reveal that the warming pattern is associated with the formation of a positive pressure anomaly core over northeast Asia by a hemispheric positive winter Arctic Oscillation (AO) mode. Moreover, the differentiated warming of AT versus sea surface temperature (SST) under the high pressure anomaly core reduces the air-sea temperature gradient, and subsequently it increases the atmospheric stability above oceans, which is associated with less formation of snow cloud. Comparisons of modeled data between current (1981~2000) and future (2081~2100) periods suggest that the intensified warming with larger anthropogenic greenhouse

* 본 연구는 기상청 기상연구소 기후연구팀에서 진행하고 있는 "수자원영향평가를 위한 기후변화 시나리오 생산 및 전망 분석" 과제비의 지원에 의해 수행되었음.

** 기상청 국립기상연구소 기후연구팀 연구원(Researcher, Climate Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration)

*** 기상청 국립기상연구소 기후연구팀장(Director, Climate Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration)

gas emission in the 21st century will amplify the magnitude of these changes. More reduction of snow impossible days as well as more abbreviation of snow seasons is predicted in the 21st century.

Key Words : wintertime precipitation, snow-to-precipitation day ratio, air-sea temperature gradient, Arctic Oscillation (AO), climate model (GFDL 2.1), climate change.

1. 서론

지금까지 우리나라 강수에 대한 대부분의 기후학적 연구는 장기간 관측자료를 바탕으로 연강수량의 60% 이상을 초래하는 여름장마, 호우, 및 태풍 등 여름철 강수현상의 지역구분(박현옥, 1986; 강만석, 2000; 박병익, 2003)이나, 종관상태 분석(이병설 · 김성삼, 1983)에 초점을 두었다. 기상학적 연구는 주로 개별적인 여름철 집중호우 사례를 중심으로 상하층 대기의 종관상태 분석(박순웅 등, 1986; 박종서 · 이내영, 1985; 윤원태 등, 2001)이나 지역규모의 호우예측 모델개발 및 향상(Lee and Hong, 1989; 위태권 · 이동규, 1994; 김동균 · 전해영, 2000; 박창현 등, 2003)에 초점을 두고 많은 연구들이 이루어졌다. 반면, 연 강수량의 20% 미만을 차지하는 겨울철 강수에 대한 연구는 여름철 강수 연구들에 비하여 그 수가 적다. 지금까지 겨울철 강수에 대한 연구들은 강설지역 구분 및 강설 지역 특성 분석(정관영 등, 1999; 이승호 · 천재호, 2003; 이정미 · 이승호, 2006), 대설(heavy snowfall)의 공간적 분포분석(이병설, 1979; 김성삼, 1979; 전종갑 등, 1994; 서은경 · 전종갑, 1991) 및 종관패턴 분석(이훈 · 이태영, 1994; 이재규, 1999; 정영근, 1999; 유동봉 · 김경익, 2005) 등의 내용을 다루었다.

최근 기후변화와 관련하여 다른 나라에서는 겨울 강수의 발생빈도, 강도, 공간적 범위, 지속기간에 변화가 나타나 봄철 가뭄 등 다양한 사회경제학적 문제점이 발생하고 있다. 가령, 미국서부의 로키 산맥에서는 최근 적설이 감소함에 따라 하천 수위가 낮아지는 현상 때문에(Cayan *et al.*, 2001; Stewart *et al.*, 2005; Regonda *et al.*, 2005; Cannon, 2005) 주변지역 주정부에서 봄철 수자원 사용에 관련된 정책 결정에 대해 논쟁이 발생하기도 하였다. 또한, 이 지역에서는 최근

겨울철 눈피복이 봄철에 눈이 녹는 시기가 빨라져 산불 발생빈도와 강도가 증가하였다고 보고 되었다(Westerling *et al.*, 2006). 또 다른 예로서, 알프스나 북아메리카의 스키 등의 관광산업 지역에서는 최근 적설량이 감소하여 인공적설 생산 비용이 상승하고, 관광객이 감소하는 등의 문제들이 발생하였다(Scott *et al.*, 2006a, 2006b; Hamilton *et al.*, 2007; OECD, 2007). 이와 같이, 겨울철 눈피복은 강수현상과 달리 수문학적으로 지표에 필요한 수자원을 초봄까지 장기간 보존하는 역할을 하기 때문에 농업, 관광업 등 사회경제 활동에 중요한 영향을 미친다.

최근 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)를 중심으로 다양한 온실기체 배출 시나리오들에 따른 전 세계적인 강수 변화에 관한 연구 결과들이 요약되었다. 최근 발간된 IPCC 4차 보고서(2007)에서는 온실기체 상승과 토지 이용의 변화로 인한 강수현상과 관련하여 기온 1℃ 상승시 대기가 수증기를 머금을 수 있는 능력은 7%씩 증가한다고 추정하였다. 또한, 21세기의 강수량 변화와 관련하여 지역에 따라 홍수나 가뭄 등 다양한 양상을 보일 것이며, 국지적으로 여름철 강수강도는 더 증가할 것으로 예상하고 있다. 한편, 겨울철 강설의 누적과 관련된 빙권(cryosphere)에서는 지난 20세기 후반에 뚜렷한 기온상승과 더불어 봄철과 여름철 북반구 눈피복 및 북극해의 얼음피복, 고산빙하 등이 감소하고 있다고 보고되었다(IPCC, 2007).

우리나라에서도 이러한 국제적인 연구추세에 맞추어 기상연구소와 대학연구소들을 중심으로 기후변화에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 특히, 우리나라 겨울철 기온 변화와 관련하여 보고된 기후변화의 주요 내용으로는 기온 상승으로 인해 지난 80년간 30일 정도 겨울의 지속기간이 짧아진 연구결과(최광용 · 권원태, 2001)를 예로 들 수 있다. 이외에도 겨울철 강수

변화와 관련하여 봄철 전구기온의 변화나 시베리아 고기압의 약화에 의한 20세기 후반 울릉도 또는 서울, 강릉, 대구에서는 신적설량이 감소하였다는 연구결과도 보고되었다(이승호·최병철, 2001; 이승호·류상범, 2003).

그러나, 겨울철 적설변화와 관련된 이러한 기존연구들에서는 한반도 일부 관측지점의 자료만을 분석하였기 때문에 변화 추세가 국지적으로만 나타나는 현상인지 아니면 한반도 전체적으로 동일하게 나타나는 지역 규모의 변화패턴인지 파악하기 힘들다. 가령, 이승호·류상범(2003)의 연구에서 강설 감소가 보고된 서울, 대구는 1960년대 후반 이후 대도시화가 뚜렷하게 진행된 곳들이다. 따라서, 이 지역들의 강설 감소 현상은 국지적인 도시열섬 현상에 의해서도 나타날 수 있을 것이다. 또한, 군산지역에서는 강설이 반대로 증가하였다고 보고되었다(이승호·류상범, 2003). 이러한 기존 연구들의 결과는 모든 관측 지점에서의 변화 추

세를 분석해 보아야 할 필요성이 있음을 지적하고 있다. 또한, 강수현상은 기온뿐만 아니라 주변 지역으로부터의 수증기의 공급 및 대기순환 등의 복합적인 효과에 의해 나타나기 때문에 기존 연구들에서 살펴본 전구기온이나 시베리아 고기압 등의 기상자료뿐만 아니라 수증기의 원천인 한반도 주변의 해양이나 다양한 북반구 대기순환 변화도 살펴보아야 할 필요성이 있다(최진식, 1985; Park and Joung, 1984). 더 나아가, 최근에는 다양한 기후모델자료에서 산출된 기온 및 강수 자료를 바탕으로 미래기후분석이 가능하게 되었다.

따라서, 본 연구에서는 지난 35년간(1973~2007) 우리나라 61개 전 관측지점의 일별 강수 및 기온자료, 그리고 한반도 주변의 종관 규모의 상층 기압장 자료 및 해수온도 자료를 종합적으로 분석하여 최근 우리나라 겨울철 강수의 변화추세와 그 원인을 밝히고자 한다. 또한, 이산화탄소 등의 대기 중 인위적 온실기체 증가에 따라 21세기 말에 예상되는 겨울철 강수변화의 추세를 기후모델(GFDL 2.1) 자료분석을 통해서 전망해 보고자 한다.

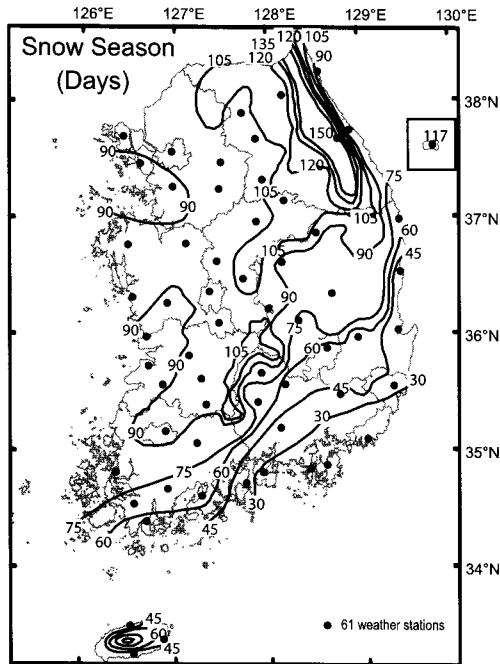


Figure 1. Long-term (1973/74~2006/07) average duration of snow seasons (the interval between the first and last snow days) for 61 weather stations across South Korea

2. 연구자료 및 방법

본 연구에서 사용된 자료는 크게 우리나라 지상관측 자료 및 북반구 상층기압장 자료, 전구 해수온도 자료, 대기순환지수, 기후모델 자료 등 다섯 가지 범주로 나뉜다. 각 자료의 특징과 사용된 연구방법들을 기술하면 아래와 같다.

1) 지상관측자료

본 연구에서는 우리나라의 기상관측이 61개 지점(Figure 1)으로 증가하기 시작한 1973년 1월 1일부터 2007년까지 기상청에서 측정된 4월 30일까지 35년간의 일별 강수량, 신적설량 및 일 최고, 평균, 최저 기온 자료를 사용하였다. 61개 관측지점 중 5°C 미만의 겨울철 지속기간이 길고(최광용 등, 2006), 강설계절(snow season)이 152일로 가장 길게 지속되는 중부 고

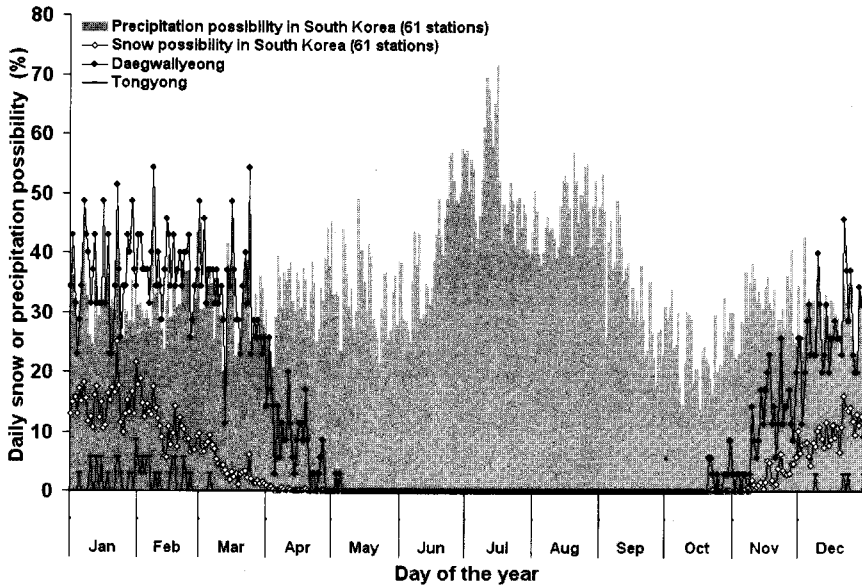


Figure 2. Intra-annual fluctuations of daily probability of snow (lines with symbols) or precipitation (gray bars) based on a long-term (1973~2007) data observed in Daegwallyeong (filled circle), Tongyong (dot line), and South Korea (open diamond; average across 61 stations in Figure 1)

Table 1. Snow indices used in this study

Snow indices	Definition	Unit
Daily probability of snowfall (일별 강설확률)	The frequency of days with snowfall on each date during the study period/the number of study years $\times 100$	%
Snow season(강설계절)	The interval between the first and last snow days	Days
The frequency of snow days (강설일수)	The number of days with snowfall	Days
Snow-to-precipitation day ratio (설수일율)	The frequency of snow days/the frequency of precipitation days during a given period $\times 100$	%
Snow intensity(강설강도)	Total snowfall/the frequency of snow days	cm/day
The frequency of heavy snow days (대설일수)	The number of days with 5cm or more of snowfall	Days
The frequency of snow impossible days(강설불가능일수)	The number of days with 5°C or more of daily mean temperature during a given period, which make snowfall impossible	Days

산지대에 위치한 대관령(Figure 1)을 기준으로 연중 분석기간을 정하였다. 대관령은 해발고도 800m이상으로 태백산맥의 고지대에 위치하여 11월부터 4월 사이의 일별 강설확률이 10~40%이다(Figure 2). 따라서, 11~

4월의 일별 강수량, 강설량 및 기온자료를 분석하였다. 특히, 본 연구에서는 겨울철 강수량과 관련되어 총 강수량, 강설량, 강설일수, 대설일수, 강설강도, 설수일율, 강설불가능일 등의 강설지수(최진식, 1990; Mekis

and Vincent, 2005)의 변화추세를 분석하였다(Table 1). 이러한 강설 지수들은 겨울철 강수의 특징을 파악하는데 유용한 기후지수들이다. 가령, 본 연구에서 사용되는 설수일율(snow-to-precipitation day ratio)은 연구기간 동안의 강수일 수에서 강설일이 차지하는 비율(%)을 나타낸다. 지난 35년 간 이와같은 강설지수의 시계열에 나타난 일차 회귀선의 변화율을 산출하여 겨울철 강수 변화 지도를 그렸다.

2) 상층기압장 자료

연구기간(1973~2007)에 해당하는 NCEP/NCAR reanalysis I 상층 자료 중 월별 또는 일별 지오폠펜셀 고도 및 온도 자료를 분석하였다(Kalnay *et al.*, 1996). 겨울철 기온과 강수 및 계절의 변화가 전세계적으로 1980년대 후반에 나타나기 때문에(최광용 등, 2006), 연구기간을 크게 1988년을 기준으로 전반기(1973~1987)와 후반기(1988~2007)로 나누어 두 기간의 기상학적 겨울철(12~2월)상층 기압장(500hPa)의 차이를 비교하였다.

3) 해수 온도 자료

본 연구에서는 미국해양청에서 생산한 Extended NOAA SST V2의 월평균 해수온도(Sea Surface Temperature; SST)를 사용하였다. 한반도 겨울철 기후 변화의 특징이 감지되는 1980년대 후반 이후(1988~2007) 기상학적 겨울철(12~2월) SST를 장기간(1971~2000) 평균값과 비교하여 편차를 구하였다. SST 편차는 태평양연안을 모두 포함하는 지역을 중심으로 지도화하였다. 또한, 한반도 주변의 기온과 SST의 차이를 구하여 해양-대기의 온도경도 분포도를 그린 후, 1980년대 후반을 기준으로 그 이전과 이후의 차이를 비교·분석하였다.

4) 대기순환 지수 자료

본 연구에서 사용된 대기순환자료는 미국 대기해양청 기후자료과(NOAA CDC)에서 제공하는 월평균 북

극진동지수(Arctic Oscillation; AO), 북대서양진동 지수(North Atlantic Oscillation: NAO), 엘니뇨 남방지수(El Niño Southern Oscillation: ENSO), 태평양-북아메리카 패턴지수 (Pacific North American pattern; PNA)이다. AO는 극지방과 중위도 지역의 기압장의 상호진동을 나타내는 지수이고(Thompson and Wallace, 1998, 2000), NAO는 북대서양의 아이스란드 근처에 위치한 저기압과 북서아프리카의 고기압간의 상호진동을 나타내는 지수이다(Wallace and Gutzler, 1981). ENSO는 적도 태평양 동서지역의 대기-해양의 상호작용에 의해 기압장과 해수면이 진동하는 현상이고, PNA는 북태평양과 북아메리카 지역의 2개의 고·저기압 쌍이 상호 진동하는 현상이다(Wallace and Gutzler, 1981). 이러한 대기순환 지수 중 특히 ENSO와 AO는 전세계적으로 여러지역과 원격상관을 보이면서 해마다 북반구의 전반적인 기후패턴 형성에 중요한 역할을 하는 대기순환으로 잘 알려져 있다. 본 연구에서는 1973~2007년 월평균지수와 우리나라 강설자료 간의 정준상관(Canonical Correlation) 패턴과 피어슨 상관계수(Wilks, 2006)를 계산하여 lead-lag관계를 살펴보는데 사용되었다. 정준상관 분석은 전년도 9월에서 해당연도 4월 사이의 월별 대기순환 지수 중 어느 시기의 값이 각 강설지수의 시계열과 상대적으로 더 유의미한 상관관계를 갖는지를 정량화하는데 사용되었다.

5) 기후모델 미래기후 자료

본 연구에서는 미국 Princeton대학 산하 지구물리 유체역학 연구소(GFDL)가 개발한 최신 기후모델인 GFDL 2.1에서 2.5° × 2.5° 간격으로 생산된 21세기말(2081~2100)의 2m 일 평균기온자료를 사용하였다. GFDL 2.1모델은 IPCC 4차 보고서(2007)의 작성을 위해 사용된 제 3세대(CM3) 전세계 약 60개의 기후 모델들 중의 하나이다. 본 연구에서는 IPCC가 Special Report on Emission Scenarios(SRES)를 통해 제시한 미래의 온실기체 배출 시나리오 중 저배출에서 고배출을 대표하는 B1, A1B, A2 시나리오에 따라 모의된 기후 모델자료를 대표값으로 사용하였다. 본 연구에서

사용된 모델 자료는 2.5°×2.5° 간격으로 우리나라 남부(중심 : 35.393°N, 128.75°E)와 중부(중심 : 37.416°N, 128.75°E)의 대부분을 포함한다. 크기의 격자자료이다. 이 두 격자내의 강설계절(11~4월) 일 평균기온 중 강설발생 조건과 관련된 기온 임계치(일 평균 기온 0°C와 5°C)의 20년 평균 발생빈도를 평균한 자료를 산출하여, 이를 20세기 후반(1981~2000) 모델자료에서 산출한 20년 평균 발생빈도와의 차이를 비교·분석하였다.

3. 현재(1973/74~2006/07) 우리나라 겨울철 강수의 변화

Figure 3는 연구기간 동안 전국 61개 관측지점 평균적인 강설계절(11~4월)에 내린 총 강수량 및 강설량, 강설빈도, 설수일도의 시계열이다. 지난 35년 동안 61개 관측지점 평균적인 총 강설량은 4.3cm/decade의 비율로 감소하였다. 이 변화율은 95% 이상의 유의수

준에서 통계적으로 유의미한 추세를 나타낸다. 각 관측지점별 시계열의 일차 회귀선에서 산출한 기울기 값의 분포도에 따르면, 지난 35년 연구기간 동안 겨울철 총 강설량은 영남지역을 제외한 우리나라 대부분의 지역에서 감소추세를 보였다(Figure 4(a)). 이러한 패턴은 몇몇의 대도시 지역에서만 나타나는 것이 아니라 우리나라 전체에 걸쳐서 나타나기 때문에 도시열섬 효과보다는 한반도 기후변화의 한 단면으로 나타나는 현상이라고 볼 수 있다.

강설량 감소율은 지형에 따라 구분되어 크게 영서, 영동, 호남, 영남 지역에서 유사한 값들을 보여준다(Figure 4(a)). 이 분포도에 따르면, 상대적으로 높은 강설량 감소율은 동북부 해안지역을 따라 분포한다. 영동지역의 강설량 감소율은 10~14cm/decade의 범위를 이루는데, 이는 영서지역 감소율의 약 2배 이상에 해당된다. 또한, 우리나라의 최다설지(연평균 234cm)인 울릉도에서는 연구기간 동안 강설량 감소율이 46cm/decade로 전국 61개 관측지점 중에 가장 높게 나타났다. 영서지방의 경우에는 저지대보다는 해발고도가 높은 산간지역에서 감소율이 더 크게 나타났다.

남부지역의 강설량 변화율은 소백산맥을 경계로 구

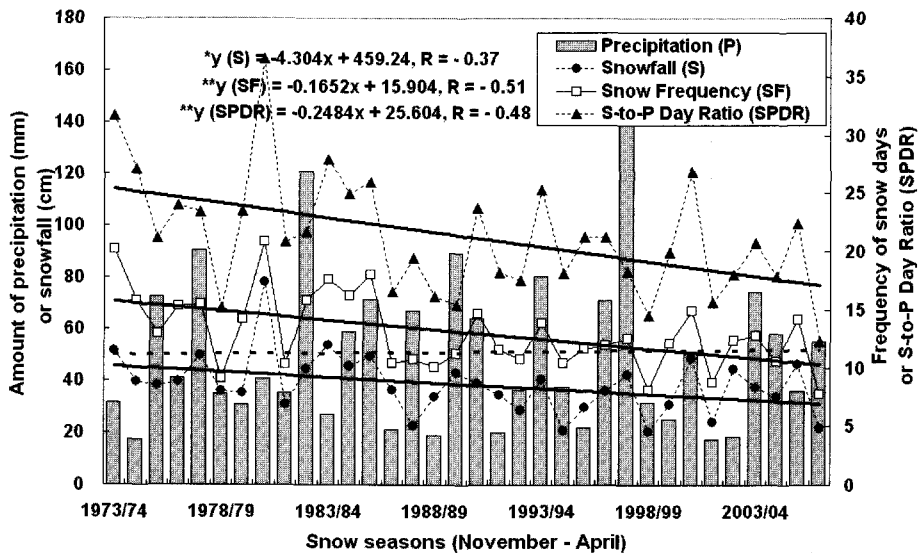


Figure 3. Changes in precipitation, snowfall, the frequency of snow days, and snow-to-precipitation day ratio averaged across 61 weather stations in snow seasons (November–April) for the 1973/74~2006/07 period. *: 95% of significance, **:99% of significance

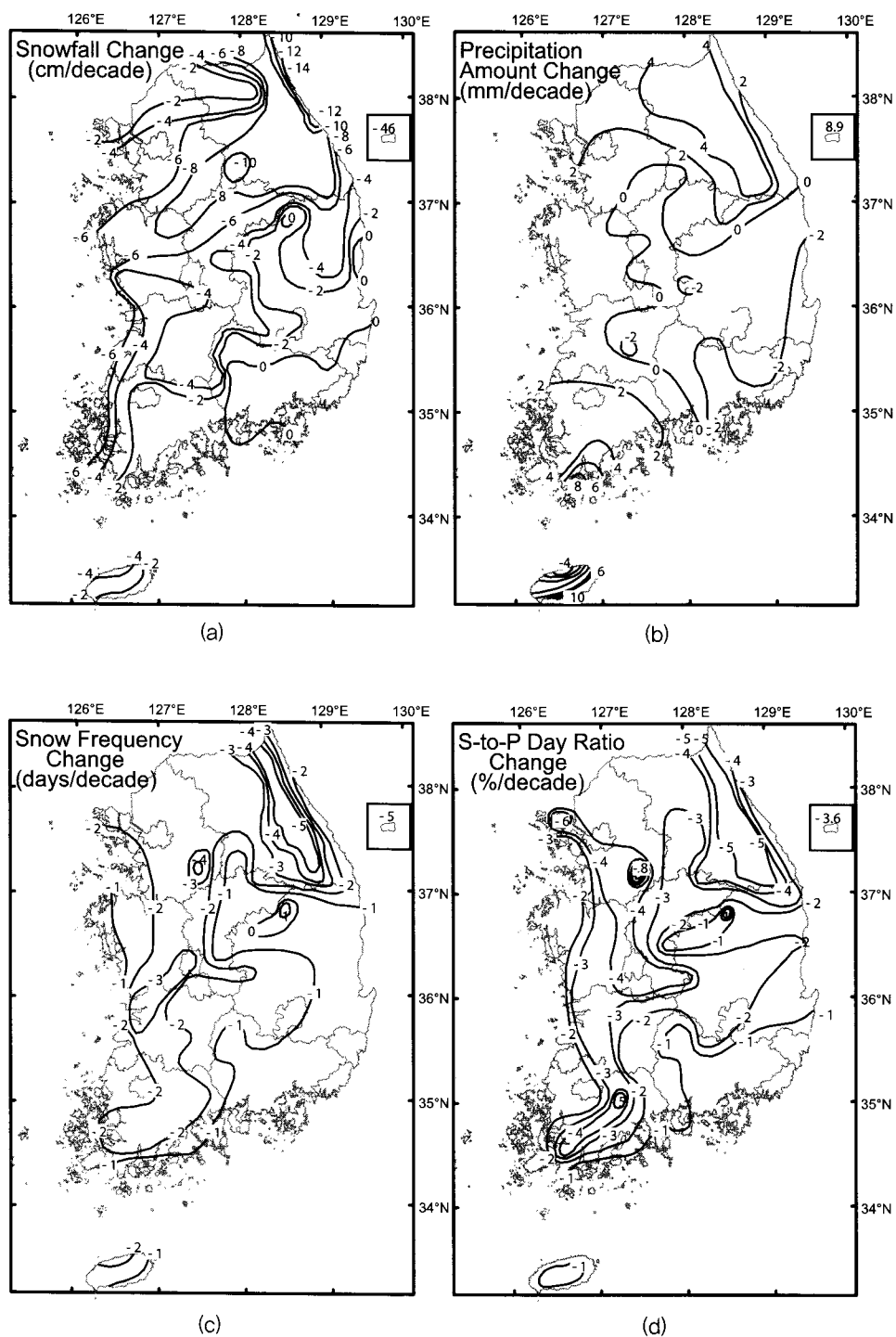


Figure 4. Changes in snowfall (a), precipitation (b), the frequency of snow days (c), and snow-to-precipitation day ratio (d) across South Korea between November and April for the 1973/74~2006/07 period

분되었다. 소백산맥의 남서쪽과 서해안을 따라서 강설량 감소율은 2~6cm/decade의 범위를 보인다. 대조적으로, 태백산맥의 남부와 소백산맥의 동부에 해당하는 경상도 지역에서는 0~2cm/decade의 범위의 낮은 감소율을 보인다. 영남지역의 낮은 감소율은 중위도 편서풍의 강수 그늘 지역에 해당하여 원래 연평균 총 강설량 자체가 4~19cm로 적기 때문이다. 이외에도 제주도의 경우에도 시베리아 고기압에서 불어오는 북서계절풍의 바람받이에 위치한 북서방향의 제주시의 총 강설량 감소율이 바람그늘에 위치한 남동방향의 성산포에 비하여 3배 이상 크게 나타났다.

연구 기간 동안 신적설이 기록된 발생일(the frequency of snow days)의 변화추세를 살펴보면, 우리나라 전체 평균적으로 1.7days/decade의 비율로 그 발생빈도가 줄어 들었다(Figure 3). 이 비율은 99%이상의 유의수준에서 통계적으로 유의미한 추세를 나타낸다. 특히, 태백산맥 해발고도 800m 이상에 위치한 대관령에서 강설일 발생빈도 감소율이 5.2days/decade로 가장 크게 나타났다(Figure 4(c)). 한반도에서 떨어져 동해상에 위치한 울릉도의 경우에도 강설일 발생빈도가 5days/decade의 비율로 크게 감소하였다. 소백산맥을 경계로 그 이남지역보다는 그 이북지역에서 그리고 동해안 영덕 이북지역에서 강설일 발생빈도 감소율이 더 크게 나타났다. 그러나, 총 강설량의 경우와는 달리 태백산맥을 기준으로 영서와 영동지역의 추세의 차이는 거의 없다. 우리나라 강설의 대부분은 저기압이 지나갈 때와 시베리아 고기압이 중국 남부 지역이나 동베이 지역으로 그 세력권이 확장할 때 부는 북서 혹은 북동 계절풍이 해양을 지나면서 증발한 대기중의 수증기가 지형의 전면과 부딪히면서 형성하게 된다(최진식, 1985; Park and Joung, 1984). 눈구름 형성과 관련된 찬 공기의 이류에 지배적인 영향을 미치는 시베리아 고기압의 창출 범위가 과거보다 줄어들었을 것으로 사료된다. 강설빈도가 감소하는 변화가 태백산맥 및 소백산맥을 따라 강설발생에 직접적인 영향을 주는 계절풍의 바람받이에 해당하는 지역이 바람그늘 지역에 비하여 더욱 뚜렷하게 나타나는 패턴도 이를 뒷받침 해준다.

한편, 연구기간 동안 우리나라 대부분의 지역에서

강설량과 강설빈도가 모두 감소하는 경향을 보인 반면, 강설량(snowfall)과 강우량(rainfall)을 모두 포함하는 11~4월 총 강수량(total precipitation)은 우리나라 전체적으로 특징적인 변화가 없었다(Figure 3). 국지적으로 울릉도 및 태백산맥 고산지역, 남서부 도서지역 및 제주도의 남동부에서는 강수량이 오히려 4~10mm/decade의 증가추세를 보였다(Figure 4(b)). 일부 영남 해안지역에서는 강수량이 0~2mm/decade 비율의 감소추세도 보였다. 이러한 최근의 겨울철 강설량과 강수량의 추세를 종합하면, 우리나라 겨울철 강수 형태는 점차 강설에서 강우로 바뀌고 있음을 알 수 있다.

겨울철 강설에서 강우로 바뀌는 변화 정도를 정량화하기 위해 11~4월의 강수일 수에서 강설일이 차지하는 비율을 나타내는 설수일율(snow-to-precipitation day ratio)의 연구기간 동안 변화를 살펴보았다. 우리나라 전체적으로 설수일율은 2.5%/decade의 비율로 감소하였다(Figure 3). 이 변화율은 99%이상의 유의수준에서 통계적으로 유의미한 추세를 나타낸다. 지역적으로는 영서 및 남서 중산간 지역과 동해안 및 태백산지 지역을 중심으로 연구기간 동안 약 3~6.6%/decade로 높은 감소율을 보였다(Figure 4(d)). 특히, 강화도에서는 6.6%/decade, 대관령에서는 감소율이 5.9%/decade로 비교적 높게 나타났다. 남동 해안지역에서는 감소율은 1%/decade로 상대적으로 작게 나타났다.

겨울철 강설강도(snow intensity)의 변화를 살펴보면, 중부지역의 영서지역과 동북해안지역에서는 강설강도가 감소하였다(Figure 5(a)). 특히, 원주와 제천지역에서는 강설강도 감소율이 4cm/decade로 높게 나타났다. 그러나, 태백산맥 및 대부분의 남부지역에서는 강도 변화가 미약하였고, 남동 해안지역을 따라서 강설강도는 오히려 3~9cm/decade 비율로 높아졌다. 가령, 영덕에서는 강설강도가 9cm/decade로 가장 높은 증가율을 보였다. 강설강도가 감소한 지역에서는 5cm 이상의 신적설을 기록한 대설 발생빈도 추세도 유사한 분포패턴을 보였다(Figure 5(b)). 태백산맥 및 소백산맥지역 그리고 영남지역에서는 대설일 발생빈도에 거의 변화가 없었다. 그러나, 동북해안지역 및 영

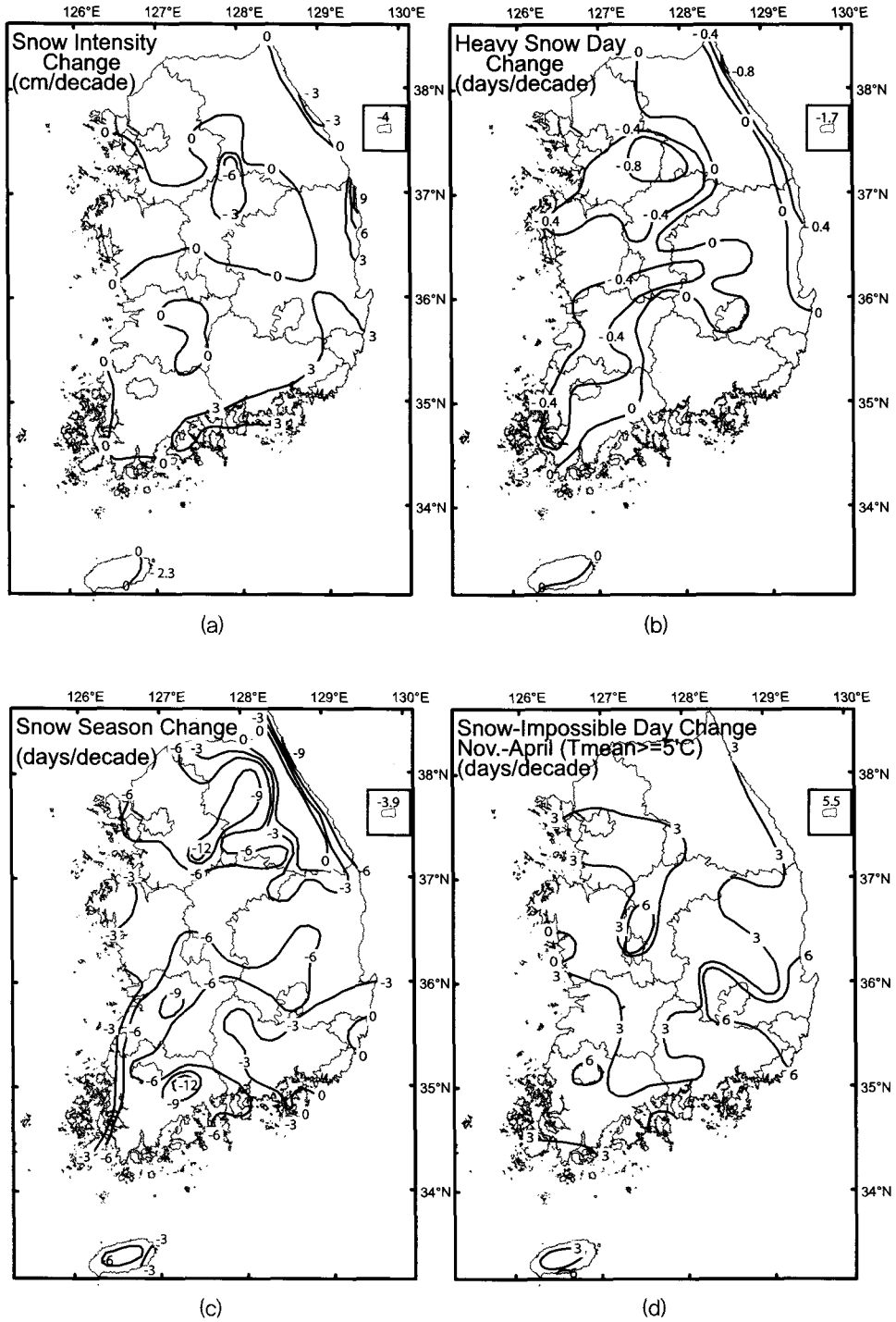


Figure 5. Changes in snow intensity (a), the frequency of heavy snow day (b), the duration of snow season (c), and the frequency of snow impossible days (d) across South Korea between November and April for the 1973/74–2006/07 period

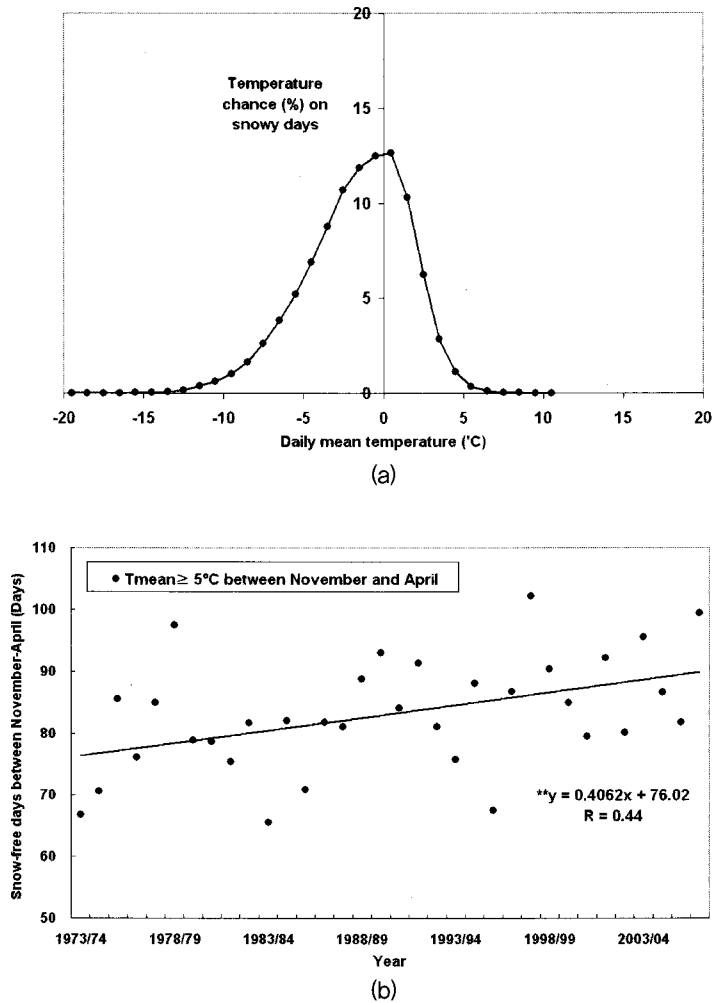


Figure 6. Daily mean temperatures for snow days (a) and the interannual variations of snow impossible days (b) averaged across 61 weather stations in South Korea for the 1973/74~2006/07period. **: 99% of significance

서와 남서 내륙지역에서는 대설 발생빈도의 감소율이 0.4 days/decade로 크게 나타났다. 울릉도의 경우에는 대설 발생일의 감소율이 1.7days/decade로 61개 관측지점 중 가장 뚜렷하게 나타났다. 한편 초겨울에 처음 신적설이 기록된 날짜와 늦겨울에 마지막 기록된 날짜 사이의 기간을 나타내는 강설계절(snow season)은 연구기간 동안 3~12 days/decade의 비율로 짧아졌다(Figure 5(c)). 특히, 강설계절의 축소율은 중부 영서와 남서 내륙지역 그리고 동북해안지역에서 6

days/decade 이상으로 높게 나타났다. 반면, 태백산맥의 고산지역에서는 다른 강설계절 변화의 공간 패턴과는 달리 강설계절 길이에 거의 변화가 없었다. 고산지역에서는 해발고도의 상승에 따른 기온감을 때문에 결빙이하 보다 훨씬 낮은 온도로 유지되는 기간이 길다. 따라서, 최근 온난화에 의한 겨울철 기온 상승분을 고려하더라도 고산지역의 기온이 강설계절 동안(11~4월) 결빙온도 이하로 유지되는 기간에는 큰 변화가 없게 된다.

강설에 필요한 기온 조건을 알아보기 위하여, 연구기간 동안 기록된 모든 관측지점의 모든 신적설일의 일 평균기온의 상대적인 분포를 살펴보면, 강설일은 일 평균기온이 $-12\sim 5^{\circ}\text{C}$ 일 때 주로 발생한다(Figure 6(a)). 특히, 일 평균기온이 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 일 때 강설 발생빈도가 가장 높으며, 5°C 이상에서는 거의 발생하지 않는다. 따라서, 강설 계절 동안(11~4월)의 5°C 이상의 일 평균기온을 기록하는 날을 강설불가능일(snow impossible day)로 정의하고, 연구기간 동안의 변화추세를 살펴보았다(Figure 6(b)). 그 결과 연구기간 동안 61개 지점 평균적으로는 11~4월 사이에 강설불가능일

이 4.1days/decade의 비율로 증가하였음을 알 수 있다. 이 회귀선의 기울기 값은 99%이상의 유의수준에서 통계적으로 유의미한 추세를 나타낸다. 공간적으로 우리나라 대부분의 지역에서 1~6days/decade의 비율로 강설불가능일이 증가하였다(Figure 5(d)). 특히, 영서내륙, 남서 및 남동 내륙지역, 울릉도 제주남부 지역 등을 중심으로 증가하였다. 상대적으로 해발고도가 높은 태백산맥과 소백산맥의 고산지역에서는 그 증가율이 작게 나타났다.

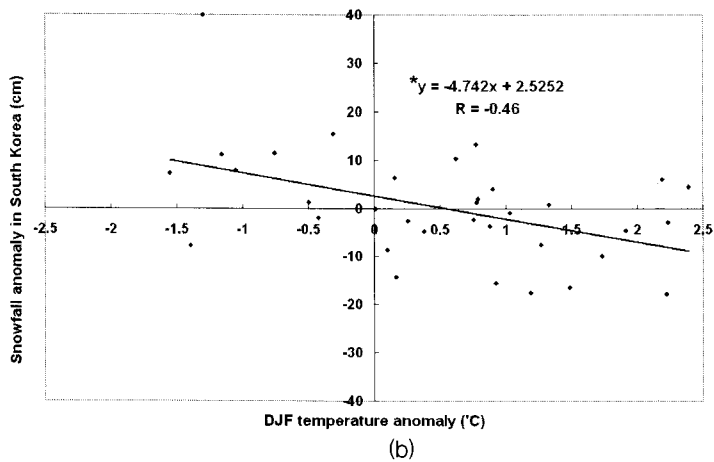
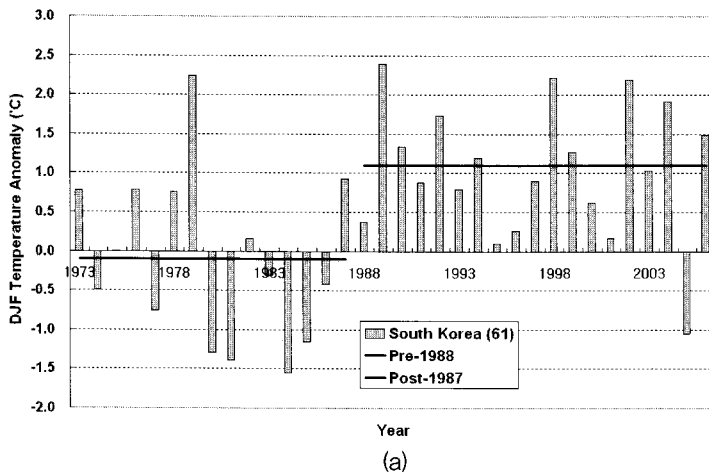


Figure 7. Anomalies of surface air temperature in South Korea (a) and its relationships with snowfall anomaly (b) during the meteorological winter (DJF) between 1973 and 2006. *: 99% of significance

4. 최근 우리나라 겨울철 강수 변화의 원인

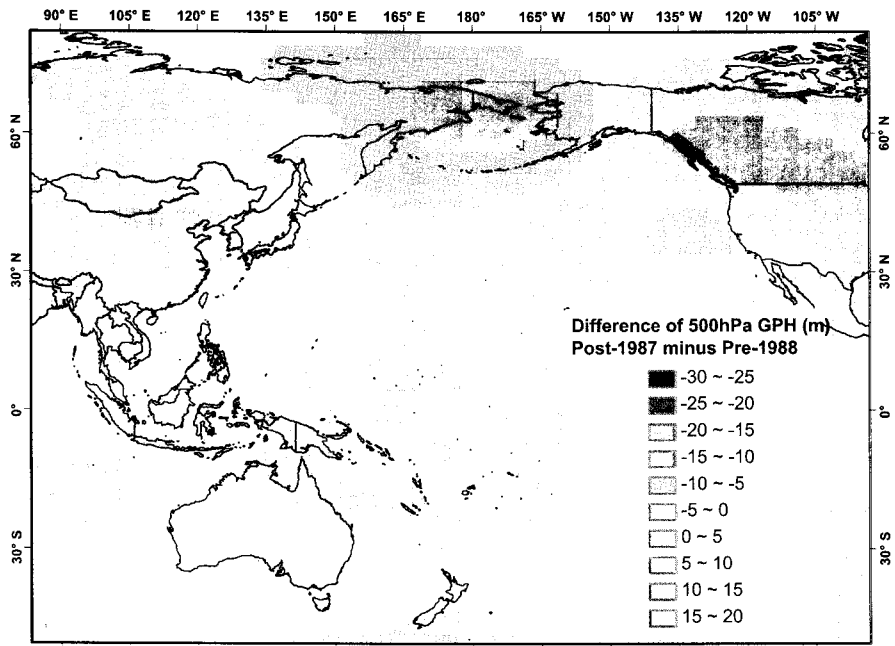
본 연구에서 밝혀진 겨울철 강수형태 변화의 원인을 살펴보기 위해, 연구기간 동안 61개 관측지점에 대해 평균한 기상학적 겨울철(12~2월)의 평균기온 아노말리의 변화를 살펴 보았다. 그 결과, 기온 아노말리의 가장 뚜렷한 변화는 1980년대 후반에 나타났다(Figure 7). 1988년 이전(1973~1987)에 비하여 이후(1988~2006)의 기상학적 겨울철 평균기온은 61개 지점 평균적으로 1.2℃ 상승하였다. 지역적으로는 두 기간 사이에 문경에서 0.6℃로 가장 소폭으로 상승하였고, 원주에서 2.1℃로 가장 많이 상승하였다. 이러한 겨울철 지상기온 상승은 강설이 강우의 형태로 바뀌는데 중요한 영향을 미치게 된다. 실제 61개 지점 평균 겨울철 총 강설량의 아노말리와 12~2월 평균기온의 아노말리와의 상관관계를 살펴보았다(Figure 7(b)). 그 결과 12~2월 평균기온이 1℃ 상승하면 우리나라 평균적으로 약 4.7cm의 겨울철 강설량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이 회귀선의 기울기 값은 99%이상의 유의수

준에서 통계적으로 유의미한 추세를 나타낸다.

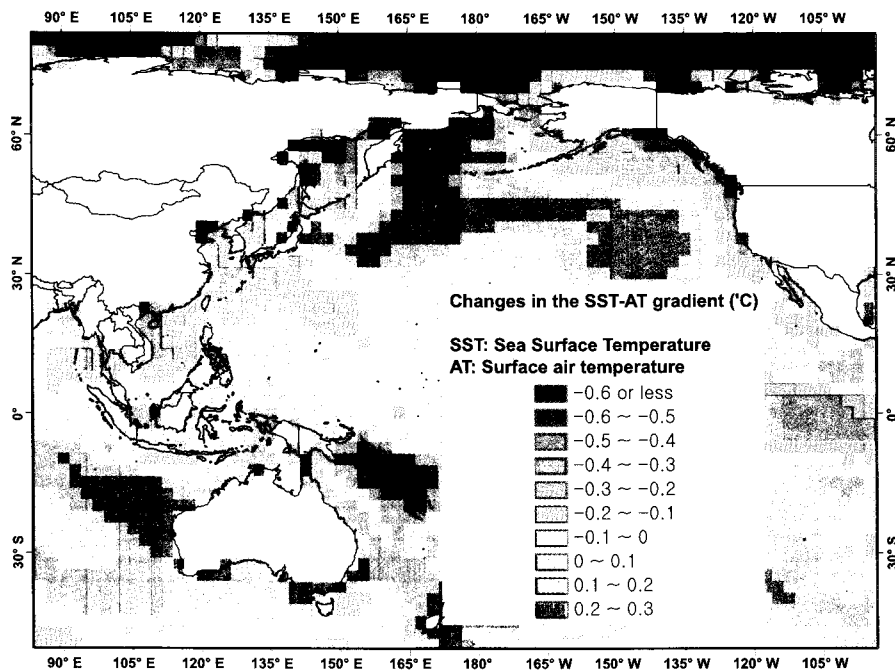
이러한 한반도 겨울철 기온 상승은 1980년대 후반 이후 한반도 주변의 기압패턴의 변화와 밀접한 관련성을 가지고 있다(Figure 8(a)). 최근(1988~2006) 북반구 기상학적 겨울철(12~2월)의 500hPa 지오폠펠셜 고도의 변화를 그 이전(1973~1987)과 비교하여 살펴 보면 양(+)의 편차핵들이 동북아시아와 아메리카의 로키 산맥을 중심으로 나타나고 있다. 특히, 중국 북부지역에서는 이전 평균에 비교하여 1980년 후반 이후에 약 15~20m 정도 높은 지오폠펠셜 고도의 양의 편차핵이 나타나고 있다. 이 양의 편차핵 주변의 고기압성 흐름은 수직적으로는 단열 가열(adiabatic heating)에 의해 에너지를 축적시켜 겨울철에 한반도 주변의 기온을 상승시켰을 것으로 사료된다. 한편 북태평양의 알류산 열도지역에서는 반대로 음의 편차가 나타나고 있다. 이 음의 편차 주변지역에서는 겨울철 극지방에서 발원하는 찬 공기들이 저기압성 순환을 보이며, 동북아시아 지역의 고기압성 흐름과 병렬관계를 이루고 있다. 이 저기압성 흐름은 동-서 흐름에서 진폭을 가진 파동 패턴 형성을 유도하여 겨울철에 동북아 지역의 고기압

Table 2. Predictability of snow indices averaged across South Korea (Y) using the first EOF mode of monthly (September–April) atmospheric circulation indices (X) in Canonical Correlation Analyses (CCA) for the 1973/74–2006/07 period. Values for the 1st EOF of X variable in parenthesis denote X eigen values and variances explained by the first EOF mode. N/A: not available

X variable (Monthly)	The 1st EOF of X (IX loading ≥0.5)	Characteristics	Y variable (Seasonal sum or average) (IX loading ≥0.5)		
			Snowfall(S)	The frequency of snow days (SF)	Snow-to-Precipitation Day Ratio (SPDR)
AO	(+) (4.27/40%) Jan.- Feb.	Phase Correlation coeff. Month	X(+)-Y(-) 0.30 Jan.- Feb.	X(-) -Y(+) 0.58 Feb.	X(-) - Y(+) 0.54 Feb., Mar., Oct.
PNA	(+) (2.31/29%) Feb.-Apr.	Phase Correlation coeff. Month	X(-)-Y(-) 0.33 Nov., Jan., Mar.	X(+) -Y(+) 0.21 Feb.-Apr.	X(+) - Y(+) 0.17 Feb.-Apr.
ENSO	(+) (10.1/76%) Sep.-Apr.	Phase Correlation coeff. Month	X(-)-Y(+) 0.34 N/A	X(+) -Y(+) 0.03 Sep.-Apr.	X(+) - Y(+) 0.17 Sep.-Apr.
NAO	(-) and (+) (1.78/22%) Oct. and Dec.-Feb.	Phase Correlation coeff. Month	X(+)-Y(+) 0.50 Sep.	X(+)-Y(+) 0.56 Sep.	X(-)-Y(+) 0.46 Nov.



(a)



(b)

Figure 8. Differences of the winter(DJF) 500hPa geopotential height between pre-1988 (1973-1987) and post-1987 (1988-2006) periods (a) and departures of the sea surface temperature-minus-air temperature (SST-AT) for the 1988-2006 winter (DJF) period from the long-term (1971~2000) average (b) around the Pacific

성 흐름을 형성 유지시키는데 영향을 주었을 것으로 사료된다.

이러한 북서태평양을 둘러싼 지역의 겨울철 고기압-저기압의 병렬패턴은 극지방을 중심으로 한 북반구의 대기순환패턴의 변동과 밀접한 관련성이 있다. 북반구 순환지수와 우리나라 강설지수의 변동간의 유의미한 lead-lag 상관관계를 추출하기 위해 정준상관분석(Canonical correlation analysis)을 실시하였다(Table 2). 연구기간 동안 월별(전년도 9월~해당년도 4월) 대기순환지수 자료와 우리나라 61개 지점 평균 겨울철(11~4월) 강설량, 강설 발생빈도, 설수일율 등 강설지수 자료간의 정준상관 분석을 실시한 결과, 겨울철 강설지수의 변동과 북극진동(Arctic Oscillation: AO)과 유의미한 상관관계를 보였다. 해당년도 1~2월에 AO가 양(+)의 편차를 보이면, 강설지수들은 모두 감소하는 패턴을 보였다. 1980년대 후반 이후에는 겨울철 동안 AO 양의 아노말리가 자주 발생하면서 북극해를 중심으로 한 음(-)의 편차가 나타나고 중위도 지역에 양의 아노말리 핵들이 여러 지역에 나타나고 있다(Thompson and Wallace, 1998, 2000). 동북아시아에 위치한 이 고기압성 패턴도 이러한 AO의 변화에 따라 나타나는 양의 아노말리 핵 중의 하나이다. 이러한 우리나라 강설변화와 AO의 관련성은 겨울철 양의 AO 패턴이 동북아시아 봄철 개시일을 앞당겨서 겨울철 지속기간을 감소시키고 있다는 연구 결과(Choi and Robinson, 2007) 와도 일치한다

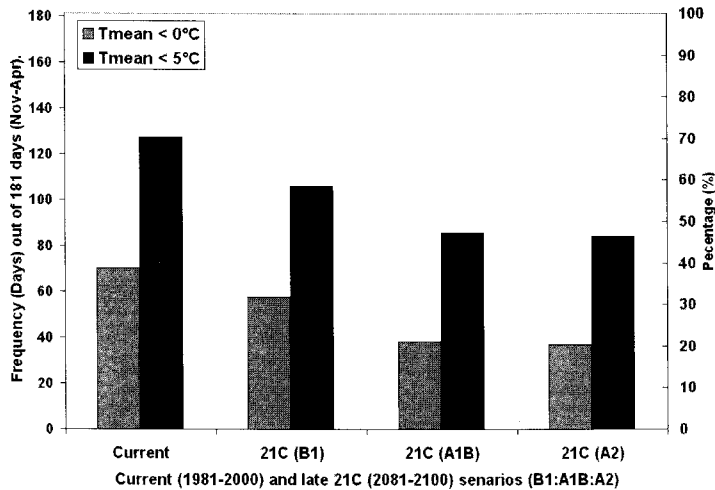
이외에도, 우리나라의 강설지수는 2~4월의 태평양 북아메리카 패턴(Pacific North American pattern: PNA)과 상관관계를 보였다. 특히, 2~4월의 PNA가 음(-)의 패턴을 보일 때, 우리나라 총 강설량이 감소하는 상관관계를 나타내었다. 반면, 엘니뇨 남방진동(El Niño Southern Oscillation: ENSO) 지수와 월별 강설빈도값의 정준상관계수는 낮게 나타났다. 또한, 북대서양 진동지수(North Atlantic Oscillation: NAO)는 우리나라 강설지수와 계절적으로 일치되는 lead-lag 상관관계를 보이지 않았다.

한편, 북반구의 기압장 변동에 따라 나타나는 한반도 주변의 양의 기압 편차는 지상기온과 해수온도의 차별적인 상승에 영향을 주게 된다. 연구기간 동안

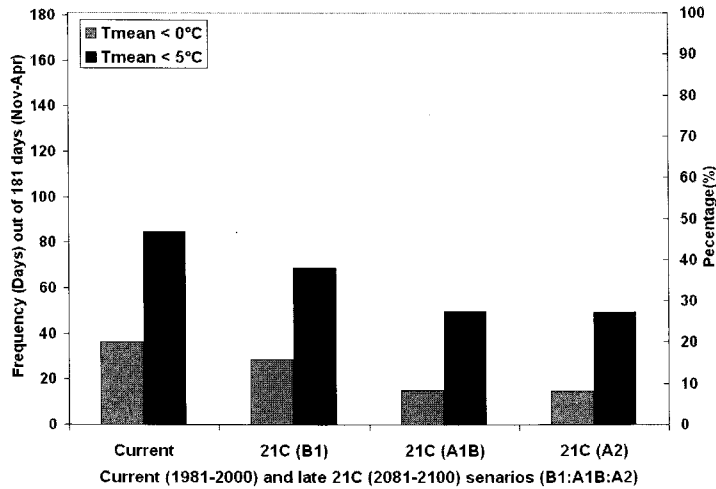
Extended NOAA SST v2 북태평양의 해수온도의 변화를 살펴보면, 최근의(1988~2006) 한반도 주변의 해수온도가 30년(1971~2000) 평균과 비교하여 약 0~0.4℃ 정도 상승하였다(그림 미제시). 또한, NCEP/NCAR reanalysis I 지상 기온의 변화를 살펴보면, 장기간 평균과 비교하여 최근에 한반도 지역의 기온도 약 0~0.8℃로 상승하였다(그림 미제시). 이러한 한반도 기온 상승률은 전 세계적으로 지난 100년간 0.74℃ 증가한 상승률에 비하면 매우 높은 것이다. 특히, 열용량이 4배 이상 높은 해수 온도의 상승 정도보다 기온의 상승 정도가 더 크게 나타났다. 따라서, 동북아시아의 고기압성 흐름은 한반도 주변의 차가운 대기와 상대적으로 따뜻한 해양을 차별적으로 가열시켜 그 온도 경도를 감소시켰다(Figure 8(b)). 이와 같은 대기-해양 간의 기온경도의 감소는 해양상의 대기 안정도를 높여서 시베리아 고기압이나 오호츠크해 고기압의 장출시 눈구름 형성을 방해하였을 것으로 사료된다.

5. 기후모델 기온자료 분석을 통한 21세기 후반(2081~2100)의 겨울철 강수변화 예측

이산화탄소를 포함한 온실기체의 증가는 인구 증가와 인구당 화석 연료 사용량 증대로 21세기 접어들어 더욱 빠르게 증가할 것으로 예상된다. 기후모델을 통해 21세기의 기후변화를 예측하기 위해 IPCC에서는 모델 상호 비교 프로젝트를 통해 다양한 온실기체 배출 시나리오에 따른 미래 기후자료를 산출하였다. 본 연구에서는 온실기체 상위, 중위, 하위 배출 정도를 대표하는 A2, A1B, B1 시나리오를 바탕으로 GFDL 2.1 기후모델에서 적분된 일 평균 기온자료를 분석하였다. 기후모델에서 생산된 미래 강수자료는 많은 불확실성을 포함하고 있기 때문에 본 연구에서는 겨울철 강수와 관련된 기온자료를 간접적으로 분석하여 21세기 후반(2081~2100)의 변화 추세를 예측하였다. 미래의 기온변화가 겨울강수 형태변화에 미치는 영향을 평가하기 위해, 물의 어는점과 관련된 일 평균기온 0℃ 이하



(a) Central



(b) Southern

Figure 9. Future (2081~2100) reductions of the freezing days ($T_{mean}<0^{\circ}C$) and the snow possible days ($T_{mean}<5^{\circ}C$) in the central (a) and southern regions (b) of the Korean Peninsula. The results are derived from modeled (GFDL 2.1) surface air temperature data using various greenhouse gas emission scenarios (B1, A1B, and A2)

결빙일(freezing day)과 일 평균기온 $5^{\circ}C$ 이하(Figure 6(a))의 강설불가능일(snow impossible day)의 변화를 살펴보았다. 20세기 후반의 모델자료를 관측자료와 비교하면 모델자료가 관측자료에 비해 낮은 기온을 나타내기 때문에, 21세기 후반 기후와의 비교는 모델자료들 간에 수행하였다. 두 기간 사이의 변화를 정량화하기 위해, GFDL 2.1모형을 이용하여 현재 강제력(modern forcing)을 넣어 산출된 20세기 후반(1981~

2000)과 온실기체 각 배출 시나리오에 근거를 둔 21세기 후반(2081~2100) 20년 평균치를 비교하였다.

모델자료 비교·분석 결과, 11~4월 동안 중부지방에서 현재 강수가 열 수 있는 일 평균기온 $0^{\circ}C$ 이하 결빙일(freezing day)의 평균 발생일은 약 70일 정도이지만 21세기말에는 약 13~33일 정도 줄어들 것으로 예상된다(Figure 9). 남부지방에서도 현재 결빙일의 발생 빈도는 11~4월간 약 36일 정도이지만, 21세기 말에는

약 7~21일 정도 감소할 것으로 예상된다. 또한, 중부 지방에서는 일 평균기온 5°C 이하의 발생빈도는 현재 127일이지만 점차 감소하여 21세기 말에는 강설불가능일이 오히려 약 21~43일 정도 증가할 것으로 예상된다. 남부지방의 경우에도 11~4월간 현재 일 평균기온 5°C 이하의 발생빈도는 약 85일이지만 점차 감소할 것으로 예상된다. 따라서 21세기 말에는 5°C 이상의 강설불가능일(snow impossible day)이 오히려 약 16~35일 증가할 것으로 예상된다. 결빙일과 강설불가능일의 변화정도를 지역별로 비교하여 보면, 21세기 말 강설에서 강우로 바뀌는 겨울철 강수형태의 변화는 남부지방보다는 중부지방에서 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 예상된다. 남부지방보다 중부지방에서 결빙일은 약 5~12일 더 감소할 것으로 예상되는 반면, 강설불가능일은 남부지방에 비하여 중부지방에서 약 5~8일 더 증가할 것으로 예상된다.

온실기체 배출 시나리오 별로 비교하여 보면, 배출이 가장 적은 B1시나리오의 경우 결빙일은 현재에 비해 중부지역과 남부지역에서 각각 13일, 7일 감소할 것으로 예상된다(Figure 9). 이에 비하여, 중위 (A1B), 상위 (A2) 시나리오로 온실기체의 배출이 늘어나게 될수록 결빙일은 21일, 32일로 약 3배 정도 더 줄어들게 될 것으로 예상된다. 유사하게, 11~4월간 강수불가능일도 온실기체의 배출이 적은 B1시나리오보다 중위 (A1B), 상위 (A2) 배출 시나리오의 경우가 약 2배 이상 더 증가할 것이라고 예상된다. Yamaguchi and Noda (2006)의 연구 결과에 따르면, 21세기에는 동아시아 지역에 겨울철 북극진동(AO)이 더욱 강한 양의 아노말리를 나타낼 것으로 예상된다. 따라서, 앞 장에서 밝혀진 AO-강설지수 상호관련성에 따라 동아시아에 기압의 양의 아노말리가 강화되어 미래에는 강설불가능일이 더 증가할 것으로 예상된다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 지난 35년 동안(1973~2007)의 우리나라 겨울철 기온 및 강수자료 분석을 통하여 겨울철

강수에 나타난 기후변화의 패턴과 그 원인을 분석하고, 각 온실기체 배출 시나리오에 근거한 기후모델자료 분석을 통하여 21세기 후반(2081~2100)의 겨울철 강수 형태 변화를 예측하여 보았다. 주요한 연구결과들을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 우리나라 겨울철 강수형태가 점차 강설에서 강우의 형태로 바뀌고 있다. 관측자료 기간 동안 겨울철 총 강수량에는 뚜렷한 변화가 없었으나, 겨울철 신적설량과 발생빈도는 감소하여, 설수일율이 감소하는 추세를 보였다. 이러한 추세는 풍하측에 해당하는 영남지역을 제외한 대부분의 지역에서 나타났다.

둘째, 우리나라 강설 계절의 길이가 남동부 해안지역과 해발고도 800m 이상 태백산맥의 고산지대를 제외한 대부분의 지역에서 짧아지고, 강설불가능일은 반대로 증가하고 있다. 특히, 영서 및 남서 중산간 지역, 동북해안지역을 중심으로 강설계절이 6~12days/decade 비율로 짧아지고 있다.

셋째, 강설강도와 대설일의 발생빈도는 대부분의 영동 및 영서지역을 중심으로 감소하는 경향을 보였다. 특히, 영서 내륙 지역과 울릉도, 동북해안 지역에서 강설강도가 3cm/decade, 대설일 발생빈도가 0.4days/decade의 비율로 감소하고 있다. 반면, 태백 및 소백 산맥의 고산지역 및 북서계절풍의 풍하측에 해당하는 영남지역에서는 그 변화율이 뚜렷하지 않다.

넷째, 이와 같은 겨울철 강설량, 강설빈도, 강설계절 기간, 설수일율 등이 감소하는 현상은 겨울철 북극진동(Arctic Oscillation; AO)의 패턴과 관련성을 보인다. 이러한 한반도 겨울철 강수 형태의 변화는 1~2월의 양(+)의 AO 아노말리에 의해 형성되는 지오폠펜셜 고도장의 양의 편차핵이 동북아시아 지역에 자리잡아 고기압성 흐름이 형성되면서 한반도 상의 기온을 상승시켰기 때문에 나타난다. 또한, 이 고기압성 흐름은 한반도 주변의 해양-대기간 온도 경도를 감소시켜 해상의 눈구름의 생성을 저해하는 대기안정도를 증가시키기 때문에 우리나라 강설감소에 영향을 미치게 된다.

다섯째, 기후모델자료 분석 결과, 21세기 말에도 온실기체의 증가로 우리나라의 겨울철 강설과 관련된 결빙일은 줄어들고 강설불가능일은 점차 증가하여 강설이 강우로 바뀌는 현상이 더욱 강화될 것으로 예상된다

다. 이러한 변화는 남부지방보다 중부지방에서 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 예상되고, 온실기체의 배출 강도가 더 늘어 날수록(B1 < A1B < A2) 더욱 뚜렷해 질 것으로 예상된다.

본 연구에서 밝혀진 바와 같이 한반도 겨울철 강수 형태가 강설에서 강우로 점차 바뀌고 있고, 이러한 변화는 21세기말에 대기순환의 변화와 함께 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 예상된다. 따라서, 겨울철 강수현상에 나타나고 있는 기후변화와 관련하여 겨울철 수자원 관리 방법에 대한 새로운 접근 방법이 모색되어야 할 것이다. 가령, 겨울철 온난화에 의해 산간지역의 강수 형태가 강설에서 강우로 전환되면 수문학적 물의 순환을 더욱 가속화 될 것이다. 그 결과 늦겨울에서 초봄 사이의 가뭄이 악화될 수 있다. 또한, 현재 고산지역의 강설은 해발고도 상승에 따른 기온감률 때문에 특정 고도이상에서는 온난화 하에서도 녹지 않고 초봄까지 남아있게 된다. 그러나, 미래에 온실기체가 증가함에 따라 온난화율이 더욱 증가하면 이러한 적설이 유지되는 설선 고도가 점차 연중 이른 시기에 높아질 것이다. 이와 같이 강설계절이 짧아지면 고산 주변지역의 늦봄에는 물 부족 현상으로 고랭지 농업의 생산율이 감소하거나, 스키 등과 같은 겨울철 관광업의 유지 비용이 상승하는 등의 사회경제적 손실을 가져올 수 있다. 또한, 우리나라 대부분의 큰 하천 발원지는 태백산맥이나 소백산맥 등의 고산지역이기 때문에 강설의 감소는 주변 저지대에도 봄철 물부족 심화를 가져올 수 있다. 더불어, 산지주변의 이러한 수분의 계절성 변화가 식생의 수직적 분포에 중요한 변화를 가져올 것으로 예상된다.

따라서, 앞으로는 겨울철 강수 현상에 나타난 기후 변화가 수자원의 계절적 변동에 미치는 영향을 보다 자세한 지역별 스케일로 정량화할 필요성이 있다. 더 나아가 우리나라 산간 지역의 봄철 가뭄이나 겨울철 관광업의 운용 등에 대비할 수 있는 효율적인 수자원 관리 체계를 구축해 나갈 필요성이 있다.

謝辭

논문에 필요한 자료와 심사비를 지원해 준 한국 기상청 국립기상연구소와 모델생산 및 관측한 상층 대기 및 해양 종관 자료를 제공한 미국 해양대기청(NOAA) 과 Princeton University의 GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)에 감사드린다. 또한, 기후모델 자료 초기 형태변환에 도움을 준 미국 유타대학 기상학과 김준수 군과 논문 향상에 도움이 되는 토론에 참여해준 국립기상연구소의 임찬철, 김문현 연구원과 덕거스대 지리학과 박사과정의 Nelun Fernando양에게 감사드린다.

文獻

- 강만석, 2000, "한국의 여름 강수량 변동의 지역성," 한국 지역지리학회지, 6(3), 139-152.
- 김동균·전혜영, 2000, "집중호우와 연관된 산악 효과에 대한 수치적 연구," 한국기상학회지, 36(4), 441-454.
- 김성삼, 1979, "남한의 10cm이상 강설의 기상조건," 한국 기상학회지, 15(1), 1-10.
- 김성삼·정창희·박순용·이병설, 1983, "다우장마와 파우장마시의 장마전선의 구조적 특징," 한국기상학회지, 19(1), 12-32.
- 박병익, 2003, "장마전선 위치로 본 한반도 강수분포의 특성," 한국지역지리학회지, 9(2), 192-202.
- 박병익·윤석은, 1997, "한국의 동계 강수 분포에 관한 중관기후학적 연구," 대한지리학회지, 32(1), 31-46.
- 박순용·정창희·김성삼·이동규·윤순창·전영근·홍성길, 1986, "1984년 9월 1-3일에 한국에서 발생한 호우의 종관적 특성 분석," 한국기상학회지, 22(1), 42-81.
- 박중서·이내영, 1985, "1980년 8월 25-26일 남한에서 발생한 집중 호우의 종관 기상학적 연구," 한국기상학회지, 21(3), 44-52.
- 박창현·이화운·정우식, 2003, "지리산 부근 집중호우 발생시 하층제트와 지형의 영향," 한국기상학회지, 39(4), 441-458.

- 박현욱, 1986, "남한의 강수량 연변화 유형과 강수지역," 지리학, 21(1), 26-36.
- 서은경 · 전종갑, 1991, "1990년 1월 29일-2월 1일 한반도에서 발생한 대설에 관한 연구," 한국기상학회지, 27(2), 165-179.
- 위태건 · 이동규, 1994, "한반도 집중호우 수치모델을 위한 Fritsch-Campbell 수분과정의 반예측 검증," 한국기상학회지, 30(3), 537-563.
- 유동봉 · 김경의, 2005, "도플러 레이더 관측에 의한 강설운의 운동학적 특성과 구름졸 발달 분석," 한국기상학회지, 41(6), 877-896.
- 윤원태 · 박정규 · 이재원 · 이현수 · 민승기, 2001, "1998년 여름철 한반도 집중호우 특성분석," 한국기상학회지, 37(2), 181-194.
- 이경미 · 이승호, 2006, "호남지방의 국지적 강설 분포와 그 차이의 원인에 관한 연구," 대한지리학회지, 41(4), 457-469.
- 이병설, 1979, "남한의 강설분포에 관한 연구," 지리학과 지리교육, 9, 224-235.
- 이병설 · 김성삼, 1983, "장마계의 종관적 특성," 한국기상학회지, 19(1), 1-11.
- 이승호 · 천재호, 2003, "시베리아 고기압 확장시 호남지방의 강설분포 - 노령 산맥 서사면 지역을 중심으로-", 대한지리학회지, 38(2), 173-183.
- 이승호 · 류상범, 2003, "전국 기온 상승이 한국의 적설량 변화에 미치는 영향," 대한지리학회지, 38(4), 463-477.
- 이승호 · 최병철, 2001, "울릉도의 적설량 변화," 한국기상학회지, 37(4), 317-328.
- 이재규, 1999, "대관령과 강릉 지역의 강설량 차이를 일으키는 종관구조 : 사례연구," 한국기상학회지, 35(3), 319-334.
- 이훈 · 이태영, 1994, "영동지역의 폭설 요인," 한국기상학회지, 30(2), 197-218.
- 전종갑 · 이동규 · 이현아, 1994, "우리나라에서 발생한 대설에 관한 연구," 한국기상학회지, 30(1), 97-117.
- 정관영 · 정영선 · 황병준, 1999, "주성분 분석을 이용한 한반도 강설 지역 구분," 한국기상학회지, 35(3), 466-473.
- 정영근, 1999, "호남지방 대설 발생의 종관 환경," 한국지구과학회지, 20(4), 398-410.
- 최광용 · 권원태, 2001, "20세기 우리나라 자연 계절 전이와 생활 기온 지수의 변화," 지리교육논집, 45, 14-25.
- 최광용 · 권원태 · Robinson, D.A., 2006, "우리나라 계절 개시일과 지속기간," 대한지리학회지, 41(4), 435-456.
- 최진식, 1985, "동해와 그 연해안 대설의 기후학적 연구," 지리학, 31, 68-85.
- 최진식, 1990, "남한의 강설지역구분과 강설의 지역적 특성," 지리학, 41, 35-48.
- Cannon, A.J., 2005, Defining climatological seasons using radially constrained clustering, *Geophysical Research Letters*, 32, L14706, doi:10.1029/2005LG023410, 2005.
- Cayan, D.R., Kammerdiener, S.A., Dettinger, M.D., Caprio, J.M., and Peterson, D.H., 2001, Changes in the onset of spring in the western United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 399-415.
- Choi, G. and Robinson, D.A., 2007, Temporal and spatial changes in Northern Hemisphere floating climatological seasons, *Proceedings of the 2007 National Meeting of the American Geophysical Union (AGU)*, San Francisco, CA, USA.
- Hamilton, L.C., Brown, C., and Keim, B.D., 2007, Ski areas, weather and climate: time series models for New England case studies, *International Journal of Climatology*, 27, 2113-2124.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D. Manning, M. Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H.L.(eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski,

- C., Wang, J., Jenne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Lee, D. K. and Hong, S.Y., 1989, Numerical experiments of the heavy rainfall event occurred over Korea during 1-3 September 1984, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 25(4), 233-260.
- Mekis, E. and Vincent, L.A., 2005, Precipitation and temperature related to climate indices for Canada, *Proceedings of the 16th Conference on Climate Variability and Change*.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), 2007, *Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management*. <http://www.oecd.org/document/45/0,2340,en264934361378194371111,1,00.html> accessed 6 January 2007.
- Park, S.U. and Joung, C.H., 1984, Air modification over the Yellow Sea during cold-air outbreaks in winter, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 20, 35-50.
- Regonda, S.K., Rajagopalan, B., Clark, M., and Pitlick, J., 2005, Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the western United States, *Journal of Climate*, 18, 372-384.
- Scott, D., McBoyle, G., Mills, G., and Minogue, A., 2006a, Climate change and the sustainability of ski-based tourism in eastern North America: A reassessment, *Journal of Sustainable Tourism*, 14(4), 376-398.
- Scott, D., McBoyle, G., and Minogue, A., 2006b, The implications of climate change for the Quebec ski industry, *Global Environmental Change*, 17(2), 181-190.
- Stewart, I.T., Cayan, D.R., and Dettinger, M.D., 2005, Changes toward earlier streamflow timing across western North America, *Journal of Climate*, 18, 1136-1155.
- Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M., 1998, The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophysical Research Letters*, 25, 1297-1300.
- Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M., 2000, Annular modes in the extratropical circulation part I: month-to-month variability, *Journal of Climate*, 13, 1000-1016.
- Wallace, J.M. and Gutzler, D.S., 1981, Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Monthly Weather Review*, 109, 784-812.
- Westerling, A.L., Hidalgo, H.G., Cayan, D.R., and Swetnam, T.W., 2006, Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity, *Science*, 313, 940-943.
- Wilks, D.S., 2006, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, the 2nd edition, Academic Press.
- Yamaguchi, K. and Noda, A., 2006, Global warming patterns over the North Pacific: ENSO and AO, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84, 221-241.
- 교신 : 최광용, 156-720, 서울특별시 동작구 신대방동 460-18 기상청 국립기상연구소 기후연구팀 (이메일 : tribute@hanmail.net)
- Correspondence: Gwangyong Choi, Climate Research Team, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, 460-18, Sindaebang-dong, Dongjak-gu, Seoul, 156-720, Republic of Korea (email: tribute@hanmail.net)
- 최초투고일 08. 01. 16.
최종접수일 08. 03. 10.