

한국의 이상기온 출현 빈도의 변화와 그 요인에 관한 연구

허인혜* · 이승호**

Changes of Unusual Temperature Events and their Controlling Factors in Korea

Inhye Heo* and Seungho Lee**

요약 : 본 연구에서는 우리나라의 여름과 겨울철의 이상기온 출현 빈도의 변화와 그에 영향을 미치는 요인과의 관계를 파악하고자 하였다. 우리나라의 대부분 관측 지점에서는 여름철 이상고온 출현 빈도의 증가와 겨울철 이상저온 출현 빈도의 감소 경향이 뚜렷하다. 이러한 이상기온 출현 빈도의 변화는 대기 순환 지수 중 겨울철 이상기온 출현에 영향을 미치는 겨울 몬순 지수와 시베리아 고기압 강도 지수 및 북극 진동 지수, 그리고 여름철 이상저온 출현에 영향을 미치는 오호츠크해 고기압 강도 지수와 북태평양 지수 등의 변화 경향과 유사하다. 이 지수들은 이상기온의 변화에 영향을 미치는 요인 중 최근의 지구 온난화 경향을 반영하며 우리나라 전 지역의 이상기온 출현 빈도와 관계가 뚜렷하다.

주요어 : 이상기온 출현 빈도의 변화, 지구 온난화, 대기 순환 지수

Abstract : This paper aims to analyze changes of unusual temperature events on summer and winter and their controlling factors. There has been obviously an increased frequencies of summer unusual high temperature occurrence and decreased frequencies of winter unusual low temperature at most of stations. WMI, winter SHI and AOI might be essential for prediction of unusual temperature during winter and summer OHI and spring NPI for summer unusual low temperature. These factors are crucial because they reflect the recent global warming trend as well as have apparent associations with unusual temperature occurrence frequency in Korea.

Key Words : changes of unusual temperature events, global warming, WMI, winter SHI, AOI, OHI, NPI

* 기상청 기상연구소 기후연구실(Climatic Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration), graceh@metri.re.kr

** 건국대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Konkuk University), leesh@konkuk.ac.kr

1. 서론

이상기온 현상은 평균기온의 변화에 의해 인류와 자연생태계에 미치는 영향이 크다. 인간 활동을 포함한 생태계는 기상 재해에 일정 한계까지는 적응하고 있으나 점차 극한 기온의 출현 빈도가 증가하면 적응 능력이 감소하여 각종 스트레스와 피해를 입는다.

지난 150년 동안 전구 연 평균 기온 변화는 약 0.6°C의 뚜렷한 상승경향이지만(Houghton *et al.*, 2001), 각 지역별로 일률적인 시계열 변화가 나타나지 않는다.

따라서 지역별 기온 변화를 정확하게 탐지하기 위하여 다양한 방법을 이용하여 기온 변화 경향을 표현하고 있다(Houghton *et al.*, 2001). 특히 기온을 포함한 기후 극값 현상은 그 피해의 정도가 크고 단시간에 출현하여 직접적인 영향을 주므로, 최근 선진국에서는 장기간의 양질의 자료를 이용하여 이상기온을 포함한 극한 기온에 관한 연구가 활발하다(Eastering *et al.*, 2000; Bonsal *et al.*, 2001; Klein Tank and Können, 2003).

국내에서 이루어지고 있는 이상기온에 관한 연구는 주로 대도시를 중심으로 한 특정 지역에서 출현하는 단기간의 기온 특성만을 살펴보고, 당시의 종관적인 상태만을 분석하고 있다(정영근, 1983; Kang and Suh, 1986; 김해구 외, 1997a; 1997b; 하경자 외, 2004). 그러나 지역별로 다양하게 출현하는 이상기온의 특성을 고려할 때, 지역별 이상기온의 변화 경향을 정확하게 파악하고 기온에 의한 스트레스가 가장 심한 여름철과 겨울철의 이상기온 출현에 영향을 주는 요인을 파악하여 이로 인한 피해를 줄이는 노력이 요구된다.

본 연구에서는 우리나라의 여름과 겨울철 지역별 이상기온의 변화 경향을 분석하고, 이에 영향을 미치는 전구 기온 상승 및 대규모 대기 순환과의 관계를 파악하고자 하였다.

2. 연구 자료 및 방법

본 연구의 분석 기간은 1940~1999년(60년간)이며 분석 지점은 분석 기간내 관측 자료를 보유한 강릉, 서

울, 인천, 울릉도, 대구, 전주, 광주, 부산, 목포, 제주 지역이다. 분석에 이용한 주요 자료는 기상청 관측 자료인 여름(6~8월)과 겨울(12~2월)의 일평균기온과 전구 월평균기온 자료, 각종 대기 순환 지수(시베리아 고기압과 오호츠크해 고기압 강도, 북태평양 지수, 겨울 몬순 지수, 북극 진동 지수)의 월평균 자료를 포함한 NCEP(National Center for Environmental Prediction) 재분석 자료 등이다.

이상기온을 포함한 극한 기온의 선정은 일 자료의 상·하위 극값이나 특정 기준의 표준 편차에 해당되는 값으로 양질의 장기간 자료가 요구된다. 기상청 산하의 기상대급의 관측 지점은 일괄적으로 2000년에 ASOS(Automated Surface Observing System)로 변경되었으므로 본 연구에서는 2000년 이후 기온 자료가 통계적으로 유의하게 변하였다는 광주지방기상청(2001) 연구 결과를 참고하여 자료의 동질성을 안전하게 확보할 수 있는 1999년까지의 일별 기온 자료를 선정하였다.

이상기온에 영향을 미치는 요인 분석을 위한 전구 평균기온은 University of East Anglia의 Climate Research Unit가 Web 상(<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature>)에 구축한 자료로써 평균에 대한 편차 값을 이용하였다. 시베리아 고기압(Siberian High Index, SHI)과 오호츠크해 고기압 강도 지수(Okhotsk High Index, OHI)는 NCEP(National Center for Environmental Prediction)의 재분석 자료 중 1950~1999년까지의 월평균 해면 기압으로부터 산출한 것이다. 시베리아 고기압은 1028hPa 보다 큰 고기압 중심 지역을 포함한 70°E~120°E, 40°N~60°N 지역의 해면 기압 편차의 평균값을 시베리아 고기압 지수로 정의하였다(Gong and Ho, 2002). 오호츠크해 고기압 중심 구역(145°E~155°E, 45°N~60°N)은 한랭역이 형성되어 오호츠크해 고기압이 발달한 지역을 중심으로 임장호·변희룡(2000)에 의해 정의된 것이다. 오호츠크해 고기압 강도 지수도 해면 기압 편차의 평균값을 이용하였다. 북태평양 지수(North Pacific Index, NPI)는 Trenberth and Hurrell(1994)에 의해 정의된 것으로 160°E~140°W와 30°N~65°N 사이의 월평균 해면기압에서 1000을 뺀 값이다.

시베리아 고기압과 연동되어 나타나며 북반구 중·고위도의 대기 순환 패턴 분석을 위한 북극 진동 지수(Arctic Oscillation Index, AOI)는 <http://jisao.washington.edu/data/aots/#data>에서 제공하는 Thompson and Wallace(1998)에 의해 정의된 것을 이용하였다. 이는 북극에서 20°N 영역의 월평균 해면기압 편차에 대한 주성분분석의 첫 번째 모드의 시계열을 표현한 것으로 북극 지역과 중위도 지역에서의 기압 배치에 따라 위상 변화를 보인다.

겨울 몬순 지수(Winter Monsoon Index, WMI)는 다양한 지수가 제시되고 있으나 한반도 겨울철 기온과 상관관계가 높게 나타난 전종갑 외(2002)에 의해 정의된 겨울 몬순 지수를 이용하였다. 이는 300hPa 동서 바람장을 이용한 것으로 시베리아 고기압의 변동성이 크게 나타나는 영역과 300hPa 동서 바람장과의 상관관계를 계산하여 상관성이 크게 나타나는 두 지역에 대한 300hPa 동서 바람 차이로써 정의하였다. 즉 U300(110°E~170°E, 27.5°N~37.5°N)와 U300(80°E~140°E, 50°N~60°N)의 차이를 뜻한다. 시베리아 고기압 강도 지수와 오호츠크해 고기압 강도 지수, 북태평양 지수, 북극 진동 지수, 겨울 몬순 지수는 모두 NCEP 재분석 자료를 이용하므로 1950~1999년까지의 월평균 자료이다.

이상고온과 이상저온은 세계기상기구(WMO) 기후 위원회에서 제시한 이상기상의 정의에 의하여 일평균 기온이 과거 30년 간 또는 그 이상에 걸쳐서 관측되지 않았을 정도로 평년값에서 벗어난 경우로 평년값에서 표준편차의 두 배 이상 벗어난 경우를 본 연구에서 정의하였다. 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{T}_j = \frac{1}{60N_j} \sum_{k=1}^{60} \sum_{i=1}^{N_j} T_{ijk} \quad \text{----- (식 1)}$$

$$\sigma_j = \left[\frac{1}{60} \sum_{k=1}^{60} \sum_{i=1}^{N_j} T'_{ijk}{}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{----- (식 2)}$$

여기서 $T'_{ijk} = T_{ijk} - \bar{T}_j$ 로 주어진다. 또한 식 1에서 T_{ijk} 는 일평균기온이고 이때 첨자 i 는 일, j 는 각 월의 순(旬), k 는 연도를 나타낸다. N 은 10일의 순을 기본으로 하지만 월에 따라서 하순이 8일, 9일, 11일이 이용된다. \bar{T}_j 는 순별 평년값, σ_j 는 순별 표준편차를 의

미한다. 자료 분석 시 평년값으로 사용한 시간적 기준은 위 식에서와 같이 기상청의 계절 예보에서 제공되는 최소 단위인 10일이다. 따라서 평년값은 여름철 6~8월의 상순/중순/하순과 겨울철 12~2월의 상순/중순/하순의 각 순별 평균값을 이용하였고 같은 방법으로 순별 표준편차를 이용하여 이상기온을 추출하였다.

이상기온 출현 빈도의 변화는 60년 이상의 장기간 관측 자료를 보유한 관측 지점을 분석하여 파악하였다. 서울, 강릉, 인천의 경우 한국전쟁으로 인한 결측 기간은 분석에서 제외하였다. 이상기온 현상의 월별 출현 빈도를 추출하여 기간별 증가 경향을 파악하기 위하여 1940~1969년, 1950~1979년, 1960~1989년, 1970~1999년의 30년 기간별 출현 빈도를 분석하였고 변화 경향성을 파악하기 위하여 7년 이동평균을 구하여 참고하였다.

이상기온의 출현 경향은 전구적인 기온 상승과 기온 변동에 의해 영향을 받으므로 전구 기온과 기온 변동을 파악할 수 있는 각 대기 순환 지수(김해구 외, 1997a; Wettstein and Mearns, 2002; Domonkos *et al.*, 2003; 임은순 · 안중배, 2004 등)와 이상기온 출현 일과의 상관관계를 분석하였다. 허인혜(2005)의 논문을 참고하여 강도가 높은 여름철과 겨울철 각 이상기온 출현일의 상층 평균 바람장과 기온장을 분석하여 이상기온 출현에 영향을 미치는 대기 순환 관계를 파악한 후 우리나라 여름철과 겨울철 기온 변화에 영향을 미치는 고기압(시베리아, 북태평양, 오호츠크해), 몬순 등을 이상기온 출현 요인으로 선정하였다.

3. 이상기온의 출현 빈도 변화

1) 이상고온

각 분석 지점의 여름철 이상고온 출현 빈도를 30년 기간별로 평균하여 보면 점차 증가하는 경향이다(표 1). 특히 1970~1999년 기간의 연평균 출현 빈도는 그 앞 기간에 비하여 뚜렷하게 증가하였다.

남부 지역의 동쪽에 위치한 대구, 부산은 1940~1969

표 1. 30년 기간별 여름철 이상고온의 연평균 출현 일수

지점 기간	강릉	울릉도	서울	인천	전주	광주	목포	대구	부산	제주
1940-1969		1.8			0.7	0.6	0.9	0.4	0.4	1.6
1950-1979	1.8	1.6	1.1	1.4	1.0	0.7	0.7	0.6	0.5	1.8
1960-1989	2.4	1.6	1.2	1.5	1.1	0.7	0.6	0.8	0.6	1.6
1970-1999	2.9	1.8	2.1	2.3	1.5	1.7	1.5	1.4	1.8	2.1

년에는 연평균 여름철 이상고온 현상이 0.4일이었으나, 1970~1999년에는 약 3배 이상 증가하여 각각 1.4일, 1.8일이다. 남부 지역의 서쪽 내륙에 위치한 전주와 광주도 1940~1969년에는 연평균 여름철 이상고온 현상이 각각 0.7일, 0.6일이었으나 1970~1999년에는 각각 1.5일, 1.7일로 증가하였다. 중부 지역의 서울과 인천도 1950~1979년부터 꾸준히 증가하여 1970~1999년에는 연평균 출현 빈도가 2배 정도 증가하였다. 반면에 울릉도, 목포, 제주는 최근에는 증가하는 경향이지만 다른 지역과는 달리 1940년대 이후 감소하거나 큰 변화 없다가 1970~1999년에 들어서 증가하였으며 그 폭이 크지 않다. 그러나 이 지역 중에서도 비교적 도시화가 더 진행된 목포의 1970~1999년간의 그 출현 빈도가 크게 증가하였다.

30년 기간별로 보면 겨울철 이상고온의 출현 빈도도 여름철과 같이 전반적으로 증가하는 경향이지만 그 폭이 작다(표 2). 여름철에 1970~1999년의 평균 이상고온 출현 빈도가 앞의 기간에 비하여 그 증가 폭이 컸던 것에 비하여, 제주를 제외하고 겨울철의 그 출현 빈도의 증가 폭이 작다. 또한 남부 지역의 서쪽에 위치한 전주와 목포는 그 앞 기간에 비하여 1970~1999년 기

간에는 감소하는 경향이다.

대구와 부산은 1940~1969년 기간에 연평균 겨울철 이상고온 출현 빈도가 각각 1.4일, 1.1일이었지만 다른 지역과는 달리 지속적으로 증가하여 1970~1999년 기간에는 그 빈도가 각각 2.1일, 1.2일 출현하였다. 부산보다 대구의 연평균 겨울철 이상고온 출현 빈도의 증가 폭이 크다. 서울, 인천도 자료를 분석한 1950~1979년 기간의 연평균 이상고온 출현 빈도가 이후 30년 기간별로 최근까지 지속적으로 증가하였다. 내륙에 위치한 서울, 대구의 기간별 연평균 출현 빈도가 해양의 영향을 받는 인천과 부산에 비하여 지속적 증가가 뚜렷하다.

분석 기간(1940~1999년)내의 이상고온의 출현 빈도는 전반적으로 증가하는 경향이다. 그 증가는 겨울철에 비하여 여름철에 더 크고, 1990년 이후 그 변화가 더욱 뚜렷하다. 비교적 도시화가 진행된 내륙에서 그 증가 경향이 뚜렷하고, 해양에 인접한 지역에서 상대적으로 출현 빈도의 증가와 감소가 반복된다. 또한 생리적으로 높은 기온에 대한 스트레스는 겨울철에 비하여 여름철에 높기 때문에, 이상고온 출현의 증가 경향이 더 뚜렷한 여름철의 생태학적 스트레스가 더 심각하게 고려되어야 한다.

표 2. 30년 기간별 겨울철 이상고온의 연평균 출현 일수

지점 기간	강릉	울릉도	서울	인천	전주	광주	목포	대구	부산	제주
1940-1969		1.5			2.5	2.2	2.0	1.4	1.1	2.6
1950-1979	0.5	1.9	0.3	2.0	3.0	2.7	2.4	1.7	1.1	2.8
1960-1989	0.5	1.7	0.4	2.0	2.6	2.5	2.0	1.9	1.1	2.6
1970-1999	0.6	1.8	0.5	2.2	2.2	2.6	2.0	2.1	1.2	3.1

표 3. 30년 기간별 여름철 이상저온의 연평균 출현 일수

지점 기간	강릉	울릉도	서울	인천	전주	광주	목포	대구	부산	제주
1940-1969		2.5			2.7	2.7	2.6	3.7	4.3	1.9
1950-1979	1.3	1.9	2.7	2.6	2.8	3.1	2.8	2.8	3.0	1.5
1960-1989	0.8	1.8	2.2	2.0	2.1	3.2	2.7	2.1	2.2	1.3
1970-1999	0.7	1.9	2.3	2.1	2.5	3.5	3.2	2.3	2.1	1.7

2) 이상저온

표 3은 60년 동안의 여름철 이상저온의 출현 빈도를 30년 기간별로 평균한 것이다. 남부 서쪽에 위치한 전주, 광주, 목포를 제외하고 30년 기간별 연평균 출현 빈도가 1940~1969년 기간 이후 지속적으로 감소하다가 1970~1999년 기간에 그 수치가 증가하였다. 전주, 광주, 목포 지역은 증가와 감소 이후 1970~1999년 기간에 다시 증가하는 경향을 보인다. 전 지역에서 1970~1999년 기간의 출현 빈도의 증가가 뚜렷하다. 분석 기간 내 지속적인 감소 경향인 강릉과 부산도 최근 30년간의 연평균 출현 빈도와 전 30년 기간별 값의 감소폭이 작다.

분석 기간 동안 이상고온의 출현 빈도는 여름철과 겨울철 모두 전반적으로 증가 경향인 것에 비하여 여름철 이상저온은 상대적으로 변동을 반복하며 감소하는 경향이다. 그러나 1980년대 이후 1980년과 1993년을 중심으로 두 차례의 냉하가 출현하며 다소 증가 경향이 나타난다.

표 4는 60년간의 30년 기간별 겨울철 이상저온의 연평균 출현 빈도를 나타낸 것이다. 1940년 이후 최근까

지 전 지역에서 겨울철 이상저온의 출현 빈도가 감소하는 경향이 뚜렷하다. 대부분의 지역에서 1950~1979년 기간의 연평균 출현 빈도가 그 전 기간의 출현 빈도에 비하여 비교적 감소폭이 크다. 이후 최근 30년(1970~1999년) 기간의 겨울철 이상저온의 출현 빈도 또한 전 30년 기간의 출현 빈도에 비하여 감소폭이 크다. 30년 기간별 겨울철 연평균 출현 빈도는 여름철 이상고온의 출현 빈도와 같이 최근 30년 들어서 변화폭이 상대적으로 가장 크다. 제주의 겨울철 이상저온 출현 빈도도 1940년 이후 거의 변화 없다가 1970~1999년 기간에 그 빈도가 감소하였다.

분석 기간 동안 이상저온의 출현 빈도는 여름철보다 겨울철에 그 빈도의 감소가 뚜렷하였다. 또한 1980년대 이후 여름철 이상저온은 감소에서 다소 증가하는 경향으로 변하고, 겨울철 이상저온은 감소 경향이 더욱 뚜렷해졌다.

1960년대 이후 지속적인 겨울철 이상저온 출현 빈도의 감소는 한파와 같은 낮은 기온 극값으로 인한 생태학적 스트레스를 감소시킬 수 있을 것이다. 그러나 변동성이 큰 여름철의 이상저온의 출현은 식물의 생육이 활발한 여름철에 큰 피해를 초래할 수 있으므로 그 변

표 4. 30년 기간별 겨울철 이상저온의 연평균 출현 일수

지점 기간	강릉	울릉도	서울	인천	전주	광주	목포	대구	부산	제주
1940-1969		2.8			1.9	2.8	2.6	3.4	2.9	1.1
1950-1979	1.4	2.2	1.4	3.7	1.5	2.1	2.6	2.7	2.6	1.1
1960-1989	1.2	2.2	1.1	3.4	1.5	2.0	2.5	2.3	2.5	1.1
1970-1999	0.6	1.3	0.7	2.3	1.0	1.1	1.7	1.5	1.5	0.8

동을 야기시키는 요인에 대한 연구와 겨울철 이상저온의 지속적 감소의 감증을 확인할 수 있는 요인에 대한 연구가 필요하다.

4. 이상기온의 변화에 영향을 미치는 요인

1) 전구 평균기온 상승 및 한반도 이상기온의 관계

전구적인 기온 상승은 1950년 이후의 이상저온 현상과 1980년 이후의 이상고온의 출현 빈도를 증가시켰다(日本氣象廳, 1993). 우리나라에서도 지난 100년간 기온이 약1.3℃ 상승하여(이명인·강인식, 1997) 온난화 현상이 뚜렷하므로 관측 시기 이후 시대별로 기후 변화의 가능성을 확인할 수 있다.

그림 1은 전구 연평균기온의 변동과 60년 이상의 관

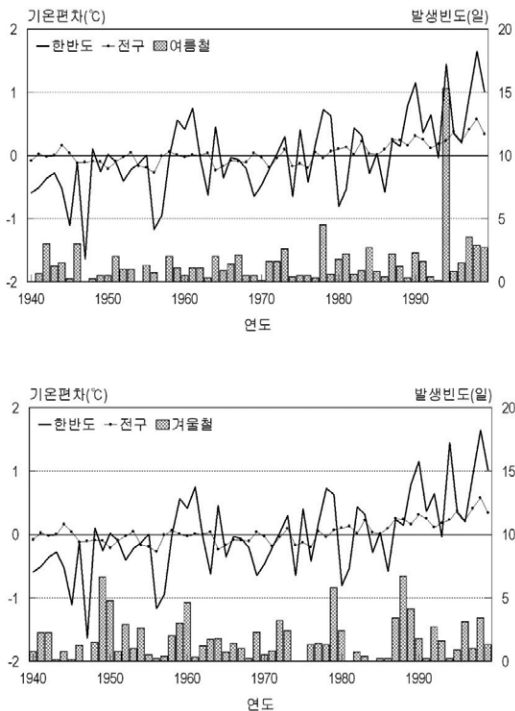


그림 1. 전구 평균기온과 이상고온 출현 빈도의 변화(1940~1999)

표 5. 전구 연평균기온과 이상고온 출현 빈도의 상관계수(r)

지점	이상고온		이상저온	
	겨울	여름	여름	겨울
강릉	0.11	0.10	-0.28	-0.58**
울릉도	0.53**	0.19	-0.01	-0.43**
서울	0.14	0.24	0.16	-0.57**
인천	0.28	0.22	-0.20	-0.40**
전주	0.61**	-0.44**	-0.04	-0.27*
광주	0.57**	-0.05	-0.03	-0.37**
목포	0.31*	-0.08	0.03	-0.48**
대구	0.59**	0.28*	-0.38**	-0.52**
부산	0.58**	0.09	-0.46**	-0.45**
제주	0.17	0.24	0.03	-0.37**

* 유의수준 $\alpha=0.05$ (양측 검정)

** 유의수준 $\alpha=0.01$ (양측 검정)

측 자료를 보유한 10개 지점의 연평균기온과 앞에서 분석한 여름과 겨울철 이상고온의 출현 빈도를 표현한 것이다. 여름철 이상고온의 출현 빈도는 1980년대 이후 전구 평균기온 상승과 더불어 증가하였으며, 1990년대 들어서면서 그 경향이 더 뚜렷하다. 특히 1990년대 중반 이후 한반도와 전구 평균기온의 상승 폭 증가와 함께 여름철 이상고온 출현 빈도의 증가도 뚜렷하다.

분석 기간 중 각 분석 지점의 여름철 이상고온 출현 빈도는 전구 평균기온과 양의 상관관계가 있다(표 5). 7년 이동평균의 경우 강릉과 제주를 제외한 대부분의 지역에서 두 변수 간에는 상관계수 $r=0.31\sim 0.61$ 로 양의 상관관계를 갖는다.

겨울철 이상고온 출현일은 여름철과는 달리 전구 평균기온과 대구 지역에서만 통계적으로 유의한 양의 상관관계가 있다. 또한 한반도 중부 서쪽 지역을 중심으로 두 변수 간에는 음의 관계가 있으며 전주 지역의 경우는 상관계수 $r=-0.44$ 로 통계적으로 유의한 음의 상관관계가 있다. 즉 지역별로 전구 평균기온과 겨울철 이상고온과의 관계가 다양함이 확인된다. 따라서 이상고온 출현 빈도와 전구 평균기온은 겨울철보다는 여름

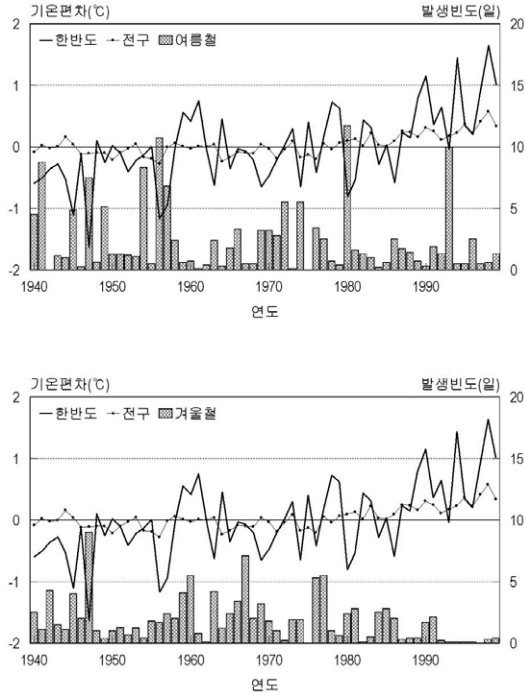


그림 2. 전국 평균기온과 이상저온 출현 빈도의 변화(1940~1999)

로 한 대도시 지역에서 그 관계가 더 뚜렷하다.

이상저온 출현일은 여름철의 경우 전국 평균기온 상승보다는 한반도 평균기온 변동과 밀접한 관계가 있다(그림 2). 즉 여름철 이상저온 출현 빈도는 전국 평균기온 상승과는 뚜렷한 관련성을 찾기 어렵고 한반도 평균기온 변동의 영향을 받는다. 여름철 이상저온 출현일과 전국 평균기온 사이에는 전반적으로 음의 상관관계가 있으며 대구($r = -0.38$)와 부산($r = -0.47$) 지역에서는 그 관계가 유의하다(표 5 참조).

겨울철 이상저온 출현일은 그림 2와 같이 전국 기온이 양(+)의 편차를 보이는 1980년대 이후 감소하기 시작하여 1990년 이후에는 그 출현이 미미하다. 표 5의 전국 평균기온과 겨울철 이상저온의 출현 빈도 사이에는 전 지역에서 상관관계수 $r = -0.27 \sim -0.58$ 의 음의 상관관계가 있다. 이는 여름철과 겨울철의 이상기온 출현일 중 겨울철 이상저온의 출현과 전국 평균기온과의 관련성이 가장 높다는 것을 의미한다.

2) 대규모 대기 순환 지수와 한반도 이상기온의 관계

① 오호츠크해 고기압 및 북태평양 지수와 여름철 이상저온

오호츠크해 고기압은 봄이 되면서 오호츠크해를 중심으로 발달하는 한랭역에 의한 하층대기의 냉각으로 형성된다. 대륙붕이 발달하여 바다얼음의 형성이 쉬운 오호츠크해는 봄이 되면서 기온이 상승하여 바다얼음이 용해된다. 또한 동시베리아 지역의 쌓였던 눈이 녹으면서 아무르강을 통해 오호츠크해로 유입된다. 즉 오호츠크해의 바다얼음과 동시베리아 지역의 눈이 용해되면서 오호츠크해상에는 하층대기의 한랭역이 형성되기 시작하며 6월, 7월에 그 강도가 최대가 된다. 이는 최근 사례 연구를 통하여 여름철 이상저온 출현시 오호츠크해와 베링해로부터 한기 유입이 강화되었다는 결과(Ninomiya and Mizuno, 1984; 김해구 외, 1997a)의 도출로 여름철 이상기온과의 관련성 연구가 요구된다.

우리나라는 여름철에 아열대의 해양 상에서 발원한 북태평양 고기압의 영향을 강하게 받는다. 북태평양 고기압은 고온다습하여 높은 기온에 의한 스트레스를 과중시키므로, 여름철 이상저온의 출현은 한랭한 오호츠크해 고기압과 고온의 북태평양 고기압의 발달 정도에 의해 그 영향을 받을 수 있다.

표 6은 오호츠크해 고기압 강도 및 북태평양 지수와 여름철 이상저온과의 상관관계를 나타낸 것이다. 오호츠크해 고기압 강도 지수는 여름철 이상저온의 출현 빈도와 비교적 높은 상관관계가 있다. 여름철 이상저온의 출현 빈도는 오호츠크해 고기압의 강도가 가장 강한 여름철의 그 값과 양의 상관관계이다. 여름철 이상저온의 출현 빈도가 가장 낮은 중부 동안의 강릉 지역을 제외하고 대체로 한반도의 동쪽에 위치한 지역에서 상관관계수(r) 값이 높다. 울릉도, 대구, 부산은 오호츠크해 고기압이 강할 때 한기 유입에 직접적으로 노출되므로 여름철 이상저온의 출현 빈도와 오호츠크해 고기압 강도 지수 간에 뚜렷한 양의 관계가 있다.

여름철 이상저온의 출현 빈도는 봄철 오호츠크해 고기압 강도와는 음의 상관관계가 있다(표 6). 이는 오호츠크해의 봄철은 하층 대기의 한랭역이 완전히 형성되

표 6. 오호츠크해 고기압 강도 지수(OHI) 및 북태평양 지수(NPI)와 여름철 이상저온 출현 빈도의 상관관계수(r)

요인	봄 OHI와의 상관계수	여름 OHI와의 상관계수	봄 NPI와의 상관계수
강릉	-0.28	-0.07	-0.15
울릉도	-0.13	0.55**	-0.26*
서울	-0.19	-0.04	-0.27
인천	-0.14	-0.04	-0.23
전주	-0.38**	0.38*	-0.38**
광주	-0.24	0.34*	-0.22
목포	-0.28*	0.31**	-0.29*
대구	-0.33*	0.47**	-0.24
부산	-0.38**	0.45**	-0.24
제주	-0.28*	0.37**	-0.36**

* 유의수준 $\alpha=0.05$ (양측 검정)

** 유의수준 $\alpha=0.01$ (양측 검정)

지 않은 상태로 단지 태양고도 증가로 인한 오호츠크해 지역의 기온 상승에 의해서 오호츠크해 고기압의 강도가 결정되는 시기이기 때문이다. 그러므로 평년보다 기온이 상승하여 봄철의 오호츠크해 고기압의 세력이 약해질수록 용해의 조건이 충족되므로 여름철의 이상저온 출현이 증가할 수 있게 된다.

오호츠크해 고기압은 직접적인 한기 유입 외에도 한반도 부근으로의 남서기류 유입 및 대류활동을 약화시킨다. 즉 오호츠크해 고기압이 강할 때는 남풍 및 남동풍 유입이 저지되고 오호츠크해 고기압이 약할 때는 북태평양 고기압으로부터의 남풍 및 남동풍의 유입이 증가한다(임장호 · 변희룡, 2000). 표 6과 같이 여름철 이상저온 출현은 봄철 북태평양 지수와 음의 관계를 갖는다. 한반도 여름철 강수량은 봄철 북태평양의 기압이 낮아질수록 남부 지역을 중심으로 증가하는 경향이다(이승호 · 권원태, 2004). 이로 인한 여름철 빈번한 강수 현상은 여름철 이상저온 출현 빈도를 증가시킬 수 있으며, 이는 남부 지역에서 뚜렷하다.

그림 3은 여름철 오호츠크해 고기압 강도와 여름철 이상저온의 상관관계가 통계적으로 유의한 울릉도, 전주, 광주, 목포, 대구, 부산, 제주의 평균 여름철 이상저온 출현 빈도의 변화이다. 표준화된 오호츠크해 고

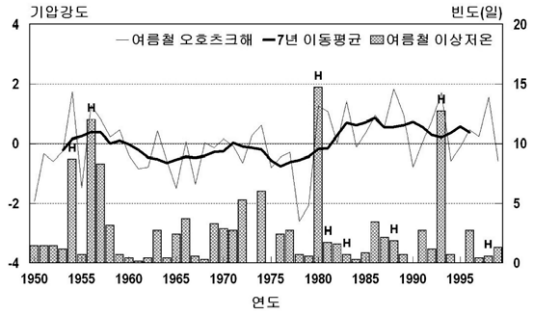


그림 3. 오호츠크해 고기압 강도 지수와 여름철 이상저온 출현 빈도의 변화(H: 오호츠크해 고기압 강도가 강할 때)

기압 강도가 1 이상인 해를 고기압이 강했던 해라고 분류(임장호 · 변희룡, 2000)할 때 1954년, 1956년, 1980년, 1981년, 1983년, 1988년, 1993년, 1998년이 이에 포함된다. 한반도 여름철 이상저온의 출현 빈도가 높았던 1954년, 1956년, 1980년, 1993년과 일치한다.

오호츠크해 고기압 강도의 7년 이동 평균값의 증가 경향은 1980년대 이후 뚜렷하고 이는 1980년대 이후 증가한 높은 여름철 이상저온 출현 빈도의 변동과 그 경향이 유사하다. 1980년대 이후 북반구 대기 순환의 변화가 두드러진 것(Houghton *et al.*, 2001)과 관련하여 봄철부터 시작되는 오호츠크해 바다얼음과 동시베리아 적설의 용해는 1980년대 이후 지속적으로 증가하여 오호츠크해 하층대기의 한랭역을 더욱 강화시킨다. 그러므로 이는 오호츠크해 고기압의 여름철 강도를 증가시킴으로써 한반도의 여름철 이상저온 출현에도 영향을 미친 것이라고 판단된다.

1960~1980년까지의 여름철 이상저온 출현은 오호츠크해 고기압의 강도와 대부분 변동이 일치하였지만, 전반적으로 오호츠크해 고기압의 강도가 약한 시기임에도 불구하고 1960년대 중반과 1970년대에 여름철 이상저온의 출현 빈도가 높다. 이는 1960년대와 1970년대가 동아시아 지역의 한랭기(Houghton *et al.*, 2001)에 해당하는 시기로 여름철의 오호츠크해 고기압의 강도는 낮았지만 이례적으로 여름철 이상저온의 출현 빈도가 높았다. 따라서 최근 오호츠크해 고기압 강도의 증가로 여름철 이상저온의 출현 빈도가 빈번하지만 1960년대와 1970년대의 한랭기의 영향으로 전 분

표 7. 동아시아 겨울 몬순 지수(WMI)와 겨울철 이상고온 출현 빈도의 상관계수(r)

지점	상관계수
강릉	-0.02
울릉도	-0.43**
서울	-0.38**
인천	-0.19
전주	-0.34**
광주	-0.51**
목포	-0.46**
대구	-0.36**
부산	-0.29*
제주	-0.60**

* 유의수준 $\alpha=0.05$ (양측 검정)

** 유의수준 $\alpha=0.01$ (양측 검정)

석기간 동안의 여름철 이상저온의 출현이 상대적으로 더욱 빈번하였으므로, 1940~1999년 동안의 전반적인 여름철 이상저온 출현의 변화는 감소하는 경향이다. 이로 인하여 앞서 분석된 전구 평균기온과 여름철 이상저온의 관계에서 통계적으로 유의하지는 않지만 음의 상관관계가 있다.

② 겨울 몬순 지수와 겨울철 이상고온

한반도는 동아시아 겨울 몬순 시스템의 일부 지역에 포함되므로 한반도의 겨울철 기후를 파악하기 위하여 동아시아 지역의 대기 순환 변동을 이해하는 것이 필요하다(전종갑 외, 2002). 동아시아 겨울 몬순은 시베리아 지역의 대규모 고기압성 순환에 의해 야기되며, 일방적인 시베리아 고기압의 강도 외에 동아시아 지역 내 대기 상태를 상대적으로 포함하여 형성되었다.

동아시아 겨울 몬순 지수와 겨울철 이상고온과의 상관계수는 강릉과 인천을 제외하고 대부분의 지역에서 강한 음의 상관관계를 나타낸다(표 7). 즉, 동아시아 겨울 몬순 지수의 수치가 작을수록 겨울철 이상고온 출현 빈도가 높아진다. 이는 전구 기온의 상승으로 겨울철 시베리아 고기압의 세력이 약할 때 한반도를 포함한 동아시아 지역과 시베리아 평원을 포함한 지역의

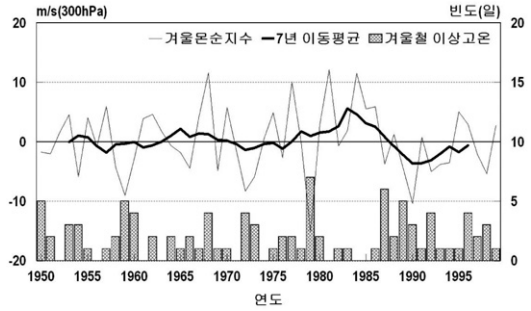


그림 4. 겨울 몬순 지수와 겨울철 이상고온 출현 빈도의 변화

상층 풍속차이가 작아져서 겨울 몬순 지수가 작아진다는 것을 의미하며, 이는 겨울철 이상고온 출현 빈도의 증가를 초래하는 요인이 된다.

그림 4는 겨울 몬순 지수와 겨울철 이상고온 출현 빈도의 상관관계가 통계적으로 유의한 울릉도, 서울, 전주, 광주, 목포, 대구, 부산, 제주의 평균 겨울철 이상고온 출현 빈도의 변화이다. 겨울 몬순 지수가 작을 때 겨울철 이상고온 출현 빈도가 높고 지수의 수치가 높을 때 겨울철 이상고온 출현 빈도가 낮다. 겨울 몬순 지수의 7년 이동 평균값의 변화에서 음(-)의 값의 감소가 뚜렷한 1980년대 중반 이후 지속적인 겨울철 이상고온이 출현하였다.

③ 시베리아 고기압 및 북극 진동 지수와 겨울철 이상기온

시베리아 고기압의 강도 변동은 겨울철 유라시아 대륙의 기온 변화를 지배하므로 우리나라의 겨울철 기온 변화에도 직접적인 영향을 미친다. 시베리아 고기압의 발달과 확장은 북극 진동의 변동성과 관계가 있으므로(Gong et al., 2000; Gong and Ho, 2002), 시베리아 고기압의 강도 변동 및 북극 진동 지수와 우리나라의 겨울철 기온 변동과의 관계 분석은 대규모 대기 순환 지수가 정량적인 변동성을 설명할 수 있는지 확인할 수 있다(임은순 · 안중배, 2004).

겨울철 시베리아 고기압 강도가 강할수록 겨울철 이상고온 출현 빈도는 낮고, 겨울철 이상저온 출현 빈도는 높다. 겨울철 시베리아 고기압의 강도와 겨울철 이상저온과의 상관관계는 강릉, 울릉도, 인천, 목포, 대

표 8. 시베리아 고기압 강도 지수(SHI) 및 북극 진동 지수(AOI)와 겨울철 이상기온 출현 빈도의 상관관계수(r)

지점	이상기온	이상기온		
	요인	이상고온	이상저온	
		겨울 SHI와의 상관계수	겨울 SHI와의 상관계수	겨울 AOI와의 상관계수
강릉		0.08	0.30*	-0.33*
울릉도		-0.17	0.30*	-0.37**
서울		-0.26	0.26	-0.39**
인천		-0.36**	0.29*	-0.47**
전주		-0.26	0.26	-0.39**
광주		-0.40**	0.25	-0.44**
목포		-0.31*	0.29*	-0.37**
대구		-0.32*	0.51**	-0.52**
부산		-0.14	0.44**	-0.49**
제주		-0.32*	0.16	-0.29*

* 유의수준 $\alpha=0.05$ (양측 검정)

** 유의수준 $\alpha=0.01$ (양측 검정)

구, 부산 지역에서 통계적으로 유의하다(표 8). 겨울철 이상고온 현상은 강릉을 제외하고 시베리아 고기압 강도와 음의 관계이고, 인천, 광주, 목포, 대구, 제주 지역에서 통계적으로 유의하다.

겨울철 시베리아 고기압의 세력은 북대서양 지역으로부터 유입되는 기류에 의해 결정되는데 이러한 기류의 이동은 북극 진동의 변동성에 의해 영향을 받게 된다(임은순·안중배, 2004). 즉 북극 진동이 양의 값일 때 기류 이동이 약화되고, 그 값이 음일 때 강화되면서 겨울철 시베리아 고기압의 강도에 영향을 미치게 된다. 따라서 북극 진동 지수가 양의 값으로 커지면 시베리아 고기압의 세력은 약화되므로 표 8과 같이 부의 상관관계를 갖는다. 이는 시베리아 고기압 강도 지수보다 겨울철 이상저온의 출현 빈도와 상관관계가 더 높다.

북극 진동 지수는 그림 5에서와 같이 매년 변동의 노이즈를 제거한 7년 이동 평균의 경우 증가하는 경향이 뚜렷하다. 그림 5는 북극 진동 지수와 겨울철 이상저온 출현 빈도의 상관관계가 통계적으로 유의한 10개의 전 분석 지점(강릉, 울릉도, 서울, 인천, 전주, 광주, 목포, 대구, 부산, 제주)의 평균 겨울철 이상저온 출현

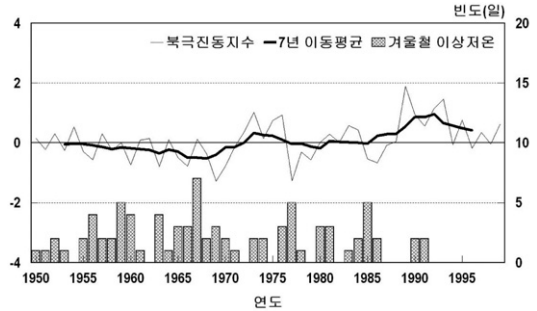


그림 5. 북극 진동 지수와 겨울철 이상저온 출현 빈도의 변화

빈도의 변화를 나타낸 것이다. 겨울철 이상저온의 출현 빈도는 북극 진동 지수의 증가 경향과는 달리 지속적으로 감소하고 있으며, 이는 1980년대 중반 이후 감소 경향이 더욱 뚜렷해지고 1990년대에 들어서는 그 출현 빈도가 낮다. 북극 진동 지수는 극 주변의 기압이 낮아질 경우 중위도 45°N 지역의 기압이 상승하며 양(+)의 증가 수치를 나타내는 것으로 극지방의 기온이 1980년대 이후 지속적으로 상승하였음을 추정할 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라의 여름과 겨울철의 이상기온 출현 빈도의 변화와 그에 영향을 미치는 요인과의 관계를 분석하고자 하였다. 이를 위하여 6~8월과 12~2월의 일평균기온과 전구 평균기온 및 오호츠크해 고기압 지수, 시베리아 고기압 지수, 북태평양 지수, 겨울 문순 지수, 북극 진동 지수 등의 대기 순환 지수를 분석하여 다음과 같은 결과를 밝혔다.

우리나라의 대부분 관측 지점에서는 여름철 이상고온 빈도의 증가와 겨울철 이상저온 빈도의 감소 경향이 뚜렷하다. 여름철 이상저온의 경우 1980년대 이후 다소 증가하는 경향이다.

여름철 이상저온의 출현 빈도는 오호츠크해 고기압 및 북태평양 지수와, 겨울철 이상고온의 출현 빈도는 겨울 문순 지수와, 겨울철 이상저온의 출현 빈도는 시베리아 고기압 및 북극 진동 지수와 각각 상관관계가

높으며 여름철 이상고온의 출현 빈도는 전구 평균기온과 상관성이 나타난다.

전구적인 지구 온난화에 의해 최근 이상기온의 출현 빈도는 변하고 있다. 겨울철 이상저온의 감소는 전구 평균기온과 음의 관계이며, 남부 지역을 중심으로 그 빈도의 증가가 뚜렷한 여름철 이상고온은 양의 관계이다. 남부 지역의 이상저온은 전구 평균기온과 음의 관계이다. 또한 최근 1980년대 이후 우리나라의 여름철 이상 저온 빈도의 증가는 같은 시기의 전구 기온 상승으로 인한 여름철 오호츠크해 고기압 강도의 강화와 봄철 북태평양 지수의 지속적인 감소로 여름철 강수 현상이 빈번해지는 경향과 일치한다. 겨울철 이상기온에 영향을 미치는 겨울 몬순 지수와 시베리아 고기압 강도 및 북극 진동 지수도 1980년대 이후 지구 온난화 영향으로 그 세력이 약해지고, 이는 겨울철 이상고온과 겨울철 이상저온의 증가와 감소를 초래하였다.

이상에서 겨울철 이상기온 출현에 영향을 미치는 겨울 몬순 지수와 시베리아 고기압 강도 지수 및 북극 진동 지수, 그리고 여름철 이상저온 출현에 영향을 미치는 오호츠크해 고기압 강도 지수와 북태평양 지수는 앞으로의 극한 기온을 예측하기 위하여 제시될 수 있는 중요한 요인이다. 이는 이상기온의 변화에 영향을 미치는 요인 중 최근의 지구 온난화 경향을 반영하며 우리나라 전 지역의 이상기온 빈도와 관계가 뚜렷하다. 이상기온 지역 중 중부 지역은 남부 지역에 비하여 각종 대기 순환 지수와의 관계가 뚜렷하지 않다. 따라서 앞으로 중부 지역의 이상기온 출현에 영향을 미치는 요인에 관한 다양한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

광주지방기상청, 2001, 호남지방의 기상 관측 환경 변화에 따른 기상 요소의 변동성 연구, 기상연구소, 16-35.

김해구 · 민경덕 · 김경익 · 이광목, 1997a, “한반도 하계 이상저온과 북반구 대기 순환의 특성 제 1부: 이상저온의 출현과 종관 개요,” 한국기상학회지, 33(1), 137-154.

김해구 · 민경덕 · 김경익 · 이광목, 1997b, “한반도 하계 이상저온과 북반구 대기 순환의 특성 제 2부: 대기 순환의 구조 및 특성,” 한국기상학회지, 33(1), 155-177.

이명인 · 강인식, 1997, “한반도 기온 변동성과 온난화,” 한국기상학회지, 33(3), 429-443.

이승호 · 권원태, 2004, “한국의 여름철 강수량 변동 -순별 강수량을 중심으로-,” 대한지리학회지, 39(6), 819-832.

임은순 · 안중배, 2004, “한반도 겨울철 기온 변동과 대규모 순환 지수와의 상관성 분석,” 한국기상학회지, 40(4), 441-452.

임장호 · 변희룡, 2000, “오호츠크해 고기압 발달 및 그와 연관된 동아시아 대기 순환의 특징,” 한국기상학회지, 36(4), 507-518.

전종갑 · 이은정 · Bin Wang · 안순일, 2002, “동아시아 겨울 몬순 지수를 이용한 겨울 몬순 특성 분석,” 대기, 103-106.

정영근, 1983, “겨울철 남한에서의 이상고온과 이상저온의 출현에 관하여,” 한국기상학회지, 19(2), 78-87.

하경자 · 하은호 · 류철상 · 전은희, 2004, “1909년 이후의 우리나라 4대 도시의 기온 경향과 극한 기후,” 한국기상학회지, 40(1), 1-16.

허인혜, 2005, 한국의 이상기온 변화와 그 요인에 관한 연구, 건국대학교 박사학위논문, 31-56.

日本 氣象廳, 1993, 近年における世界の異常氣象と氣候變動 -その實態と見通し (V), 466pp.

Domonkos, P., Kysely, J., Piotrowicz, K., Petrovic, P. and Likso, T., 2003, Variability of extreme temperature events in south-central Europe during the 20th century and its relationship with large-scale circulation, *Int. J. Climatology*, 23, 987-1010.

Eastering, D. R., Evans, J. L., Groisman, P. Ya., Karl, T. R., Kunkel, K. E. and Ambenje, P., 2000, Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 417-425.

Gong, D. Y. and Ho, C. H., 2002, The Siberian High and climate change over middle to high latitude Asia, *Theor. Appl. Climatol.*, 72, 1-9.

Gong, D. Y., Wang, S. W. and Zhu, J. H., 2000, East

- Asian winter monsoon and Arctic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2073-2076.
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C. A., 2001, *Climate change 2001: The Scientific basis*, Intergovernmental Panel on Climate change, 881pp.
- Kang, Young Q. and Suh, Y. S., 1986, Relationships between air temperature and sea surface temperature anomalies in Korea, *J. Kor. Met. Soc.*, 22(3), 7-13.
- Klein Tank, A. M. G. and Konnen, G. P., 2003, Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99, *J. of Climate*, 16, 3665-3680.
- Ninomiya, K. and Mizuno, H., 1984, Anomalous cold spell in summer over northern Japan caused by northeasterly wind from polar maritime airmass. Part: EOF analysis of temperature variation in relation to the large-scale situation causing the cold summer, *J. Meteor. Soc. Japan*, 63, 845-857.
- Thompson, D. W. J. and Wallace, J. M., 1998, The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1297-1300.
- Trenberth, K. E. and Hurrell, J. W., 1994, Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific, *Climate Dynamic*, 9, 303-319.
- Wettstein, Justin J. and Mearns, Linda O., 2002, The influence of the North Atlantic-Arctic Oscillation on mean, variance, and extremes of temperature in the northeastern United States and Canada, *J. of Climate*, 15, 3586-3600.
- 교신 : 이승호, 143-701 서울시 광진구 화양동 1번지 건국대학교 이과대학 지리학과
(이메일: leesh@konkuk.ac.kr, 전화: 02-450-3380, 팩스: 02-3436-5433)
- Correspondence: SeungHo Lee, Department of Geography, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul, 143-701, Korea
(e-mail: leesh@konkuk.ac.kr, phone: 02-450-3380, fax: 02-3436-5433)

최초투고일 05. 12. 2

최종접수일 06. 3. 13