한국의 열파 및 한파 특성에 관한 연구

허인혜¹ · 이승호²

¹건국대학교 기후연구소 · ²건국대학교 지리학과

(2016년 6월 7일 접수, 2016년 6월 30일 수정, 2016년 6월 30일 게재 확정)

Characteristics of Heat Waves and Cold Spells in South Korea

Inhye Heo¹ · Seungho Lee²

¹Climate Research Institute, Konkuk University

²Department of Geography, Konkuk University

(Received 7 June 2016, Revised 30 June 2016, Accepted 30 June 2016)

Abstract : In this study, spatio-temporal distribution was analyzed with the number of days for summer heat wave and winter cold wave defined as three or more consecutive +5% quantile days and -5% quantile days, respectively, by using daily maximum temperature in summer and daily minimum temperature in winter during 1973-2015. Although monthly heat wave occurrence has been only concentrated in July and August during the 1970s and 1980s, it had further extended into June and September since the 2000s. Monthly cold spell occurrence has been distinguished by increasing occurrence ratio in the month of December since the 2000s. The occurrences of heat waves were classified into either strong or weak cluster depending on intensity and magnitude over the entire region of South Korea rather than in specific areas. On the other hand, the occurrences of cold spell were classified by intensity of cold spell and spatial distribution of dominant cold spell areas over South Korea.

Key Words : heat waves, cold spells, hot days, cold days, cluster analysis

주요어 : 열파, 한파, 고온일, 저온일, 군집분석

1. 서론

최근 기후변화에 대한 관심은 평균값의 변화에서 극한값의 변화로 전환되고 있다. 1990년 이후 정기적으로 발간되고 있는 IPCC 보고서도 2001년 이후 이상기후에 관한 개념 제기를 시작으로 이상기후의 변화 및 특성, 영향 등에 관하여 심도 있게

다루고 있다(IPCC, 2001; 2007; 2013). 특히 기온 변화로 인한 극한 기온은 단속적인 현상보다는 며칠씩 지속적으로 출현하는 열파 및 한파 현상의 특성을 보이며 자연환경뿐만 아니라 인류 건강 및 사회 경제 분야까지 다양하게 확대되어 영향을 미치고 있다(De Bono *et al.*, 2004; Vavrus *et al.*, 2006; Beniston *et al.*, 2007; Robine *et al.*, 2008; Bar-

riopedro *et al.*, 2011; Barnett *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2014; Jeong and Heo, 2015; Kim *et al.*, 2015).

여름철 열파와 겨울철 한파와 같은 극한 기온 현상은 대표적인 기상재해로써 열 관련 사망자수를 증가시키고 에너지 소비에 직접적으로 영향을 미치는 원인이다. 1995년 미국에서 발생한 폭염은 시카고 지역에서만 700여명이 사망하였고(Semenza *et al.*, 1996), 2003년에 유럽에서 발생한 폭염은 최대 50,000여 명의 초과사망자를 발생시켰다(Brücker, 2005). 한국에서도 1994년 발생한 폭염에 의해 전국적으로 3,384명의 사망자가 발생하였고, 서울은 1993년 같은 기간과 비교할 때 988명이 초과 사망하였다(Jang, 2009). 또한 2011년에 발생한 폭염으로 인한 순환정전은 서울, 경기, 강원, 충청 등 제주도를 제외하고 전국적으로 동시다발로 정전되는 현상이 발생하면서 평소 5% 이상 이어야 할 전력 예비율이 0.35%까지 급감하여 제한 송전 조치를 취하게 되었고 그 피해액이 628억 원에 달하였다(Korea Claim Adjuster Association, 2011).

한파로 인한 극한 저온 현상은 식물 성장에 부정적인 영향을 미쳐 식생 분포 변화를 야기시킬 수 있다. 또한 한파는 건축물과 같은 다양한 사회 기반 구조를 위한 기온을 고려한 한계치를 변화시키고 사망자를 포함한 대중의 건강에도 영향을 미친다(Vavrus *et al.*, 2006; Barnett *et al.*, 2012). Wilkinson *et al.*(2001)은 영국의 경우 심장마비와 뇌졸중으로 인한 사망률이 다른 달에 비하여 12~3월에 23% 더 높고 외부 기온 19℃ 이하에서 기온이 1℃씩 감소할 때마다 사망률이 2%씩 증가한다고 하였다. 이와 같이 평년보다 극한 고온과 극한 저온 현상이 지속적으로 출현할 경우 사회 경제적 손실은 막대하다고 할 수 있다.

국내에서 이루어진 열파와 한파에 관한 최근 연구는 크게 개념 정의와 분포 특성 및 변화 분석에

관한 접근 방법과 극한 고온 현상이 건강 및 경제에 미치는 영향에 관한 접근 방법으로 구분되어 이루어졌다. Choi(2006)는 한국의 열파 정의를 열지수를 이용하여 더운 기간, 열파, 강한 열파, 매우 강한 열파 등 4단계로 구분하여 열파의 강도를 고려하여 지역 분포와 시계열적인 변화를 분석하였다. Heo(2006)와 Park(2015)은 각각 절대적 개념의 극한 고온일 및 극한 저온일, 열대일수와 서리일수를 이용하여 극한 기후지역을 구분하였다. 열파와 한파의 변화에 관한 대부분의 연구에서는 열파와 한파를 대표할 수 있는 극한 기온지수의 변화 경향을 분석하여 극한 고온 현상은 증가하고 극한 저온 현상은 감소하며 일부 지역에서는 도시화로 인한 영향이 뚜렷함을 증명하였다(Lee and Heo, 2011). 극한 고온 현상이 건강에 미치는 영향에 관한 연구는 특정 지역을 대상으로한 Lee *et al.*(2010)과 Choi *et al.*(2005)의 연구와 한반도 전 지역을 대상으로한 Jung *et al.*(2014)이 대표적이다. Lee *et al.*(2010)과 Choi *et al.*(2005)은 폭염 유발기단과 일 사망률과의 관계 및 폭염 시 노령 인구의 취약성에 관한 연구를 진행하였고 Jung *et al.*(2014)은 우리나라 전 지역의 초과 사망 임계값을 각각 산출하여 사회 구조에 따른 취약성을 분석하였다.

이와 같이 국내에서 이루어진 열파와 한파에 관한 연구는 대부분 극한 기온 현상에 대한 절대 기준 이상의 기온 변화 특성을 탐지하거나 극한 기온에 의해 직접적인 재해가 발생할 수 있는 사망자와의 관계에 대한 기초연구가 주를 이루고 있다. 그러나 국토 크기에 비하여 다양한 지리적 특성에 의해 지역별로 다른 기후 특성을 포함하고 있는 한국은 절대적 기준의 극한 기온 현상보다 상대적 기준의 극한 기온 현상에 관한 연구가 필요하다. 또한 열파와 한파가 발생할 때 각 극한 기온 현상들은 지역별로 강도와 지속 기간 및 영향을 받는 공간적 범위 등이 다양하게 나타난다. 그러므로 본 연구

에서는 열파와 한파의 사례를 선정하는 상대적 개념의 극한 기온의 기준을 제시하고 열파와 한파의 강도, 지속 기간, 공간적 범위 등의 다양한 특성을 이용하여 1973~2015년 동안 발생한 한국의 열파와 한파의 특성을 파악하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 이용한 자료는 1973~2015년까지 연속적인 기후 관측 자료를 보유하고 있는 기상청 산하 60여개 관측지점의 일별 기온 자료(일최고기온, 일최저기온, 일평균기온)이다. 열파의 극한 고온 자료는 일최고기온값을 이용하였고 한파의 극한 저온 자료는 일최저기온값을 이용하여 사례를 선정하였다.

열파와 한파의 정의는 연구자에 따라서 다양하다. 최근 Perkins and Alexander(2013)는 평년보다 심하게 더운 날이 연속적으로 발생할 경우를 열파로 간주하여 일 년 중 어느 때라도 열파 발생이 가능하다고 주장하였지만 Lhotka and Kysely(2015)의 연구에서와 같이 실질적으로 자연환경과 사회에 영향을 미치는 심각한 극한 고온을 고려한다면 여름철의 열파 현상이 가장 뚜렷할 것이다. 따라서 본 연구에서는 일년 중 온난기라고 할 수 있는 6월부터 9월까지의 여름철 열파 사례를 분석하였다.

열파를 정의하는 기준은 크게 동질한 기후 지역이나 단일 관측 지점의 기온 특성 분석에 이용할 수 있는 특정 기온 이상인 날을 선정하는 절대적 개념의 기준과 지점별 특정 quantile을 이용하여 다양한 지역적 특성이 나타나는 광범위한 지역을 분석하고자 할 때 이용할 수 있는 상대적 개념의 기준으로 구분할 수 있다. 한국은 다양한 지리적 특성이 나타나므로 본 연구에서는 상대적 개념을 이용하여 각 관측지점별 일최고기온값의 95%

이상인 극한 고온 값이 발생하는 고온일을 선정하여 연속적으로 3일 이상 발생한 사례만을 지정하여 열파로 정의하였다.

열파의 지속 기간에 관한 기준은 2~5일 이상까지 다양하지만(Ballester *et al.*, 2010; Barnett *et al.*, 2012) 일반적으로 다수의 선행 연구에서 자연환경과 인간 사회에 영향을 미칠 수 있는 기간으로 고려되어 분석되어진 3일 이상의 지속기간 기준을 이용하였다(Della-Marta *et al.*, 2007; Kysely, 2010; Lhotka and Kysely, 2015). 열파 사례를 선정하기 위해서는 고온일이 3일 이상이면서 한국에 열파 영향을 미친다고 할 수 있을 만큼의 최소한의 공간적 기준도 필요하다. 이를 위하여 Lee *et al.*(2005)에 의해 한국의 중규모 차원에서 기후지역을 구분한 2차 기후지역인 12개 기후지역에 고온일이 1개 지점 이상 발생 가능한 경우를 한국에 영향을 미치는 최소한의 공간적 기준으로 가정하여 12개 관측지점 이상에서 3일 이상 연속된 고온일이 출현한 사례를 열파라고 지정하였다.

선정된 열파 사례의 특성은 열파 강도(Ihw)와 규모(T), 열파 관측 지점수, 공간적 영향을 미치는 핵심 한파 지역 범위(A), 열파 지속 기간 등 다양한 변수를 이용하여 분석하였다(Table 1). 각 열파 발생 시 극한 고온의 강도를 분석하기 위하여 Kysely (2010)가 이용한 일최고기온 30℃ 이상인 극한 고온 기준을 한국의 폭염주의보 기준을 고려하여 일최고기온 33℃ 이상으로 수정한 후 열파 사례별로 각 관측지점의 일최고기온값이 33℃ 이상인 날들의 양의 편차값을 모두 누적하였다. 또한 열파 발생 시 95% 이상의 고온일 중 지점별 최고기온의 편차값을 추출하여 열파 사례의 규모도 분석하였다.

중부 유럽 지역의 기후 자료를 이용하여 열파의 강도 및 공간적 범위를 분석한 Lhotka and Kysely (2015)의 연구에서는 총 1,000개의 격자로 구성된

Table 1. Major characteristics of heat waves and cold spells.

Abbreviation	Description	Units	Domain
Ihw	Heat wave extremity index	℃	south korea
Ics	Cold spell extremity index	℃	south korea
T	Temperature amplitude	℃	south korea
A	Spatial extent of the HW (CS) core	number	south korea
D	Duration	days	south korea

격자수를 이용하여 열파 발생 공간 특징을 설명하였다. 그러나 본 연구에서 이용된 관측 지점의 기후 자료는 격자가 아닌 점 자료의 특성을 지니고 있어 공간적인 분포를 설명할 때 자료의 고른 분산이 확보되지 않을 경우 관측 지점 수만을 이용하여 열파의 영향을 받는 공간적 분포를 정의할 때 과소 또는 과대 추정될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 공간적 범위를 대표할 수 있는 변수로 관측 지점 수 이외에 앞서 설명한바와 같이 Lee *et al.* (2005)의 연구에서 동질 기후 지역으로 구분한 상세기후지역을 참조하여 고온일이 발생한 관측지점이 포함된 상세기후지역을 분석하여 공간 특징을 설명할 수 있는 보완 변수로 이용하였다. 또한 열파 발생 시 강한 고온일이 발생한 핵심 열파 지역을 분석하기 위하여 각 열파 사례별로 지점별 일최고기온 95% 이상인 기온 편차값들의 합이 10℃ 이상인 지역을 추출하였다(Lhotka and Kysely, 2015).

한파의 사례는 열파의 사례와 같이 강도(Ics)와 규모(T), 핵심 한파 지역의 공간적 범위(A) 등을 분석하였다. 저온일의 기준은 12월에서 다음해 2월까지의 일최저기온의 하위 5% 이하인 극한 저온이 발생한 날을 추출하여 3일 이상 연속적으로 발생한 경우를 한파로 정의하였다. 한파의 강도는 열파에서 이용한 한국의 폭염주의보 기준 대신에 한국의 한파주의보 기준으로 이용되는 일최저기온 -12℃ 이하인 기온 편차값의 합을 구하였다.

한파의 공간적 특성을 나타낼 수 있는 변수로는 열파 사례와 같이 한파 사례 시 저온일 발생 지점수, 상세기후지역수, 핵심 한파 지역 수 등을 이용하였다. 핵심 한파 지역도 한파 사례별 각 지점의 일최저기온 5% 이하인 기온 편차값들의 합이 -10℃ 이상인 지역을 추출하였다

분석기간 동안 발생한 다양한 열파와 한파를 대상으로 유사한 특성을 갖는 열파와 한파 사례를 구분하기 위하여 군집분석을 시행하였다. 군집분석은 자료의 일반화를 위하여 포함하고 있는 특성을 토대로 유사한 대상끼리 집단화하는 다변량 통계 기법으로 본 연구에서는 계층적 방법 중 ward법을 이용하였다. 군집분석에 이용한 변수는 열파와 한파의 발생일 및 종료일, 강도, 규모, 공간적 범위, 지속 기간 등으로 한국의 열파와 한파 사례의 시공간적인 특성과 강도, 규모 등을 포함하였다.

3. 열파

1) 열파의 특성 및 변동

열파 사례를 구성하는 고온일은 분석기간인 1973~2015년 동안 총 179일 출현하였으며 평균 1년에 4.2일 발생하였다. 선정된 고온일은 최소 12개 이상의 관측지점에서 분석기간 동안 해당일의 일최고기온 95% 이상인 날들이 연속하여 3일 이상 지속된 날을 의미한다. 최소 3일 이상 지속된

열파 사례는 43년간 총 36회로 26개년에 출현하였다.

Table 2는 1973~2015년 동안 발생한 대표적인

열파의 다양한 사례와 그 특성을 나타낸 것이다. 가장 심각한 열파는 1994년 7월 10일부터 7월 30일까지 발생한 것으로 총 21일 동안 지속되었던

Table 2. Major heat waves during 1973~2015.

Year	Start	End	Ihw	T	Duration	Station count	Local climate region count	A
1977	727	731	5.8	4.6	5	33	26	24
1978	704	706	1.5	3.4	3	13	12	0
1978	722	729	5.6	4.0	8	32	23	25
1981	719	722	1.8	6.9	4	17	14	13
1981	724	726	0.8	2.7	3	12	8	0
1982	807	811	2.0	3.3	5	19	15	9
1983	802	807	9.4	7.6	6	45	30	45
1984	805	813	7.5	3.9	9	32	27	29
1985	727	731	1.7	4.5	5	15	11	14
1985	805	808	1.6	4.2	4	21	15	8
1985	822	825	1.2	3.3	4	23	14	7
1988	802	805	2.4	5.6	4	26	15	14
1988	807	810	1.7	4.1	4	15	13	5
1990	727	808	13.2	6.8	13	37	25	46
1991	819	821	0.7	1.2	3	17	11	1
1994	710	730	33.2	7.2	21	35	31	56
1994	804	808	4.5	4.0	5	35	26	20
1995	813	816	1.7	5.4	4	19	17	13
1996	923	926	0.0	1.0	4	21	19	0
1997	830	901	0.7	1.0	3	12	10	0
1998	909	913	0.1	2.1	5	24	15	2
2000	702	706	1.1	1.3	5	19	13	0
2001	607	610	0.6	2.2	4	14	7	0
2005	622	625	0.9	1.9	4	18	15	0
2007	824	826	1.1	1.8	3	18	15	0
2007	919	921	0.0	1.6	3	16	13	0
2008	708	710	1.1	0.8	3	15	11	0
2008	916	919	0.2	1.5	4	33	20	0
2009	624	626	0.6	1.4	3	21	18	0
2010	821	823	1.6	1.0	3	19	17	0
2010	903	905	0.6	1.6	3	23	16	0
2011	914	917	0.2	1.6	4	35	26	0
2012	803	806	4.3	1.4	4	22	12	0
2013	808	812	4.3	1.6	5	16	17	0
2013	815	820	4.7	1.9	6	21	20	0
2015	927	929	0.0	1.7	3	19	13	0

Figure 1. Interannual variability of hot days (HDs) and heat waves (HWs) during 1973-2015.

사례와 1990년 7월 27일부터 8월 8일까지 13일 동안 지속되었던 사례가 대표적이다. 이 두 사례들은 다른 사례들에 비하여 지속 기간뿐만 아니라 열파 강도(Ihw)와 고온일이 발생한 지역의 범위(해당 관측지점, 해당 상세기후지역, 핵심 열파 지역(A))까지 포함하여 상대적으로 높은 수치를 보인다. 이와는 달리 열파의 규모를 나타내는 열파 발생 시 지점별 최대 기온 편차의 평균(T)이 최고 수치를 보인 열파 사례는 1983년 8월 2일에서 8월 7일까지 발생한 것으로 값은 7.6℃를 나타내며 이는 6일 동안 고온일이 지속되어 1990년과 1994년의 사례에 비하여 상대적으로 지속 기간이 짧은 것이 특징이다. 즉 1983년의 열파의 경우 장기간 발생한 1990년과 1994년에 비하여 고온일 지속 기간은 상대적으로 짧지만 최대 극한 고온 값은 더 높다는 것을 알 수 있다.

분석기간 동안 열파 사례는 1970년대와 1980년대에는 각각 1.5회, 1.6회 발생하였고 1990년대 이후 평균 1.3회로 값이 다소 감소하였으나 큰 변동을 보이지는 않는다. 그러나 3일 이상 지속되어 선

정된 고온일의 5년 이동평균은 1990년대 중반 이후 감소 경향이 뚜렷하다(Figure 1). 시대별로 고온 발생일을 살펴보면 1970년대와 1980년대 각각 평균 8.0일, 8.7일이었던 것이 1990년대 평균 7.1일, 2000년대 이후 평균 5.3일로 수치의 감소가 명확하다. 분석기간인 1973~2015년 동안 최강의 장기간 고온지속일이 발생한 1994년의 열파 사례를 제외한다면 1990년대의 고온발생일은 평균 4.0일로 이는 2000년대 이후의 평균 고온 발생일보다 값이 더 낮으며 1970년대와 1980년대보다 1/2 이상 감소한 것이다.

열파 사례의 변동성에 비하여 고온 발생일의 변동이 뚜렷한 것은 열파 발생 시 고온일 지속기간이 감소한 것을 추정할 수 있다. 1회 열파 발생 시 고온일 지속기간을 분석하였을 때 1970년대와 1980년대는 평균 5.8일이었던 것이 1990년대 이후부터 최근까지 평균 4.3일로 수치가 감소하였다. 1994년의 열파 사례를 제외할 경우 1990년대 이후 2015년까지 1회 열파 발생 시 고온일 지속기간은 3.9일로 1970년대와 1980년대의 값보다 32.8% 더

낮은 값을 보인다. 열파의 시대별 변동성을 분석하기 위하여 시대별 표준편차를 비교해보면 1980년대까지는 3.7이었던 것이 1990년대에 수치가 8.4로 급격하게 증가하였다가 2000년대 이후 2.6으로 변동성 값이 급감하였다. 그러나 2000년대와 2010년대의 표준편차 값을 비교해보면 각각 1.5, 3.7로 최근 변동성이 다소 증가하는 것을 확인할 수 있다.

여름철 열파가 나타나는 폭염 기간에 대한 대중적인 인지 시기는 주로 7월 하순에서 8월 상순까지 집중되는 여름 휴가 기간이다. 분석기간인 1973~2015년 동안의 대표적인 열파가 발생한 시기를 살펴보면 Figure 2와 같이 1970년대에는 7월에 집중되어 있다. 1980년대 들어서 7월 하순에서 8월 하순까지 분포한다. 그러나 7월 하순에 24.6%가 발생하였고, 8월 상순에는 56.0%가 집중되어 발생하였다(자료 미제시). 1990년대에는 7월부터 9월까지 열파가 고루 발생하였고 1980년대에 비하여 특정 시기에 열파 발생 집중도가 낮아졌다. 2000년대 이후에는 6~9월까지 열파가 발생함으로써 1970년대와 1980년대의 열파 발생 시기가 변화하였음을 파악할 수 있다. 이는 Kim *et al.*(2015)이

RCP8.5 시나리오를 이용하여 한국의 극한기온의 월별 변화를 분석한 연구에서 폭염발생이 21세기 말(2071~2100년)에는 4개월 동안(6월에서 9월)으로 확대될 것이라고 예측한 것과 유사한 결과이다. 미래 시나리오 자료에서는 21세기 말에 폭염 발생이 확대될 것이라고 전망하였으나, 본 연구에서는 관측 자료를 이용한 분석을 통하여 2000년대 이후 폭염 발생 기간이 이미 확대되고 있음을 확인할 수 있다.

2) 열파 사례의 군집 분석

각 열파 사례의 유사점과 기본 특성을 이용하여 열파 유형을 구분하기 위하여 계층적 군집 방법인 ward법을 이용한 군집분석을 시행하였다. 군집분석은 주관성을 배제하고 일정한 계산법에 따라 어떤 대상을 객관적으로 분류하기 위해 유사한 것끼리 각 그룹으로 분류하는 기법이다.

열파 사례 군집분석에 이용한 변수는 크게 3가지 특성을 포함한다. 첫 번째로 열파일 발생일의 특성을 표현하는 열파 시작일과 종료일, 열파 지속기간이며, 두 번째로 열파 강도와 규모를 표현하는 것으로 관측지점 당 평균 33℃ 이상 고온일의

Figure 2. Ratio of monthly hot days by period (1973~2015).

초과 기온 편차와 열파 기온 규모(열파 시 지점별 최대 기온 편차값) 변수를 이용하였다. 마지막으로 열파 발생 지역의 공간적 특성을 표현할 수 있는 변수로 고온일 발생 관측 지점 수, 고온일 발생 상세기후 지역 수, 핵심 열파 지역 수 등의 다양한 열파 사례별 특성을 이용하여 각 변수 값들을 표준화 한 후 군집 분석을 하였다.

Figure 3은 열파 사례의 군집분석 결과를 나타내는 Dendrogram이다. 정보 손실량의 증가가 크게 차이가 나는 32와 33 사이에서 구분한 결과, 1973~2015년 동안의 한국에서 발생한 열파 사례는 총 5개로 구분된다.

A 군집과 B 군집은 열파 강도(Ihw)와 규모(T)

모두 값이 낮으며 고온일 발생 기간(D)과 핵심 열파 지역(A)도 그 수치가 가장 낮다(Table 3). 두 군집 모두 주로 1990년대 후반에서 최근까지 발생한 열파 사례를 포함하고 있다. 두 군집의 차이는 열파 발생 시기로 A 군집의 경우 열파 발생 시기가 8월부터 9월까지 집중되었다면 B 군집은 6월부터 7월 상순까지 발생한 열파 사례를 포함한다(Figure 3).

C 군집은 열파 강도와 규모가 A 군집과 B 군집에 비하여 높은 수치로 열파 규모를 표현하는 열파 시 지점별 최대 기온 편차값(T)의 차이가 크다. 또한 A 군집과 B 군집은 핵심 열파 지역(A)이 거의 나타나지 않은 것에 비하여 C군집은 장기간 또는

Figure 3. Dendrogram of heat wave clusters.

Table 3. Mean characteristics of heat waves in individual cluster.

Cluster	Number of HWs	Ihw	T	Duration	A
A	14	1.3	1.5	3.8	0.2
B	7	1.0	1.9	3.6	0.0
C	8	1.8	4.7	4.3	10.4
D	6	7.7	5.2	7.7	31.5
E	1	33.2	7.2	21.0	56.0

※ Ihw, heat wave extremity index (°C), T, temperature amplitude (°C), A, spatial extent of the HW core (number), D, duration (days).

Figure 4. Heat waves by cluster analysis in South Korea during 1973~2015. Spatial patterns of the sum of positive Tmax deviations above the 95% quantile of summer Tmax distribution are plotted.

높은 기온의 고온일이 발생하여 10개 지역 이상에서 핵심 열파 지역이 추출되었다.

D 군집은 핵심 열파 지역(A)이 30개 이상으로 급격하게 증가하고 열파 지속 기간(D)과 열파 강도를 나타내는 Ihw도 각각 7.7일, 7.7°C로 A 군집, B 군집, C 군집과 값의 차이가 크다. 마지막으로 E 군집은 다른 군집들과 뚜렷하게 열파 강도와 지속 기간 등에서 가장 큰 차이를 보인다. 열파 강도는 33.2°C, 지속 기간은 21.0일, 핵심 열파 지역은 분석 지점 대부분의 지역을 포함하는 56개 지점에서 발생하였다. Figure 3에서와 같이 E 군집은 1994년 7월 10일부터 7월 30일까지 발생한 한 차례의 열파 사례가 구분된 것으로 연구 분석 기간 동안 가장 심각한 열파 사례라고 할 수 있다.

Figure 4는 열파 군집별로 지점별 극한 고온일 기온 편차 합의 평균값 분포를 지도화하였다. 그림의 순서는 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 열파 사례 시 극한 기온 강도를 표현하는 Ihw 수치가 높은 순으로 배치하였다. 군집별 평균 극한 고온일 기온 편차의 합은 A 군집 열파의 경우 중북부 지역에서 고온일 기온이 높은 반면 제주도를 포함한 남해안 서부 지역에서는 B 군집에 비하여 고온

일 기온이 낮은 분포를 보인다. B 군집은 A 군집과 유사하지만 전국적으로 고온일 기온의 합이 낮은 분포를 보이고 상대적으로 특정 지역에서의 높은 고온 분포를 보이지 않는다.

C 군집은 수도권 지역과 중부 내륙 지역 및 일부 남부 지역에서 핵심 열파 지역과 같은 높은 고온 발생 지역이 분포하고 Table 3에서와 같이 D 군집과 E 군집은 전국적으로 핵심 열파 지역의 분포가 급격하게 증가하였다. Figure 4에서와 같이 한국의 여름철 열파는 폭염의 지속기간이나 강도 등을 고려했을 때 특정 지역을 중심으로 특징적인 폭염이 발생하기보다는 일괄적으로 한반도 전 지역에 강한 폭염 또는 상대적으로 약한 폭염이 출현하고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 한파

1) 한파의 특성 및 변동

한파 사례를 구성하는 저온일은 분석기간인 1973~2015년 동안 총 98일 출현하였으며 평균 1년에 2.3일 발생하였다. 최소 3일 이상 지속된 한

파 사례는 43년간 총 24회로 18개년에 출현하였다.

Table 4는 1973~2015년 동안 발생한 대표적인 한파 사례의 다양한 특성을 나타낸 것으로 한국에 3일 이상 12개 관측지점 이상에서 극한 저온일이 발생한 사례를 선정한 것이므로 일부 지역을 중심으로 또는 3일 미만 출현한 극한 저온 현상은 본 한파 사례에는 선정되지 않았다. 분석 기간 동안 24회인 한파의 사례는 36회인 열파의 사례보다 상대적으로 발생 빈도가 낮다. 이는 열파가 발생하는 여름철에는 수직적으로 발달하여 안정적인 북태평양 고기압의 영향을 주로 받기 때문에 남부 지

역으로 갈수록 변질되기 쉬운 시베리아 고기압 영향을 받는 겨울철 한파는 상대적으로 그 값이 낮을 수 있다.

한파 발생 시 지점별 최대 저온 편차(T)의 값이 가장 높은 해는 1977년 2월 14일부터 2월 19일까지와 1991년 2월 22일부터 2월 25일까지로 평균 -5.2°C 이상의 최대 기온 편차 값을 나타내며 저온일 발생 지역을 포함한 핵심 한파 지역도 높은 수치를 보인다. 반면에 -12°C 보다 일최저기온이 낮은 날의 기온 편차값을 모두 누적하여 한 관측 지점 당 한파 강도를 표현하는 Ics 값이 가장 높은 사례는 1981년 1월 4일부터 1월 8일까지 5일 동

Table 4. Major cold spells during 1973~2015.

Year	Start (mmdd)	End (mmdd)	Ics	T	Duration	Station count	Local climate region count	A
1973	1222	1226	-7.2	-3.6	5	25.2	23	6
1974	0124	0126	-9.7	-4.7	3	22.3	14	6
1974	0225	0228	-1.4	-1.6	4	25.5	19	1
1976	1226	1231	-4.8	-2.9	6	31.3	28	9
1977	0101	0104	-3.0	-2.1	4	24.7	21	0
1977	0214	0219	-9.0	-5.2	6	47.8	30	51
1978	0214	0218	-1.3	-1.6	5	14.8	14	1
1980	0205	0209	-7.1	-2.2	5	31.8	23	5
1980	1228	1231	-5.6	-3.4	4	18.2	15	17
1981	0104	0108	-12.3	-4.2	5	14.4	9	8
1981	0225	0228	-2.6	-3.7	4	34.8	25	5
1981	1201	1204	-0.8	-2.5	4	26.2	22	0
1983	0212	0214	-1.4	-2.9	3	21.6	16	2
1983	0219	0221	-0.7	-2.4	3	13.0	12	0
1985	1215	1217	-0.5	-1.3	3	21.0	17	0
1986	0109	0112	-6.3	-2.6	4	18.2	13	3
1990	0125	0127	-3.0	-2.4	3	27.3	19	0
1991	0222	0225	-6.3	-5.2	4	49.7	30	35
1996	1201	1203	-0.4	-2.6	3	12.6	11	0
2001	0114	0117	-6.1	-2.9	4	26.2	23	4
2005	1217	1220	-1.6	-3.9	4	14.0	12	5
2008	1205	1207	-0.2	-2.7	3	19.0	15	0
2012	1208	1213	-4.9	-3.6	6	27.5	21	13
2013	0103	0105	-3.8	-2.8	3	24.3	16	2

안 발생한 한파이다. 저온일이 발생한 지점도 평균 14.1개 지점이고 한파 지속기간도 다른 사례에 비하여 뚜렷하게 높은 값을 보이지 않으므로 -12.3°C 라는 I_{cs} 값이 나타나는 것은 당시 일최저기온의 극한 강도의 정도가 매우 높았을 것이라 이해할 수 있다. 실제 1981년 1월 4일부터 8일까지의 한파 사례는 춘천, 원주, 수원, 충주, 청주, 대전, 강화, 양평, 이천, 인제, 제천, 보은, 천안, 부여 등에서 발생하였는데, 이들 지역의 1월 4일부터 8일까지 일최저기온의 평균값은 -22.1°C 로 매우 낮은 수치를 보였고 양평의 경우 평균 -29.4°C 로 한파 기간 동안 3일 이상이 -30°C 이하인 극한 저온 값이 출현하였다.

분석기간 동안 1970년대와 1980년대의 한파 사례는 열파 사례와 유사하게 각각 연평균 1.5회, 1.6회 발생하였으나 1990년대 이후에는 열파 사례보다 상대적으로 낮은 값인 평균 1.0회이다. 저온 발생일의 5년 이동평균은 1980년대 중반 이후 감소 경향이 뚜렷하다(Figure 5). 시대별 저온 발생일은 1970년대 평균 7.0일이었던 것이 1980년대,

1990년대 각각 5.8일, 3.5일로 점차 감소하였다가 2000년대 이후 최근까지 평균 4.1일로 다소 증가하였다.

1회 한파 발생 시 저온일 지속기간을 분석한 경우도 1970년대 5.0일이었던 것이 1980년대~2000년대까지 평균 3.5일로 수치가 감소하였다가 2010년대 들어서 4.5일로 다시 증가하였다. 열파의 지속기간이 1990년대 이후 최근까지 지속적으로 감소하는 것과는 달리 한파는 1980년대 중반 이후부터 뚜렷한 감소 경향을 보이다가 최근 지속기간이 증가하는 것이 특징적이다. 시대별 저온일 지속기간의 변동성 또한 1980년대 이전까지는 표준편차가 3.2였던 것이 1990년대와 2000년대 각각 0.7, 0.6으로 감소하며 변동성이 작아지다가 열파와 유사하게 2010년대 들어서면서 2.1로 값이 증가하며 변동성이 커졌다.

한국의 겨울철 일최저기온이 가장 낮은 시기는 대한 3~4일 후인 1월 23일 경이지만(Moon *et al.*, 2014), 평년과 비교하여 상대적으로 저온 현상이 발생한다면 12월과 2월에도 한파가 발생할 수 있

Figure 5. Interannual variability of cold days (CDs) and cold spells (CSs) during 1973~2015.

Figure 6. Ratio of monthly cold days by period (1973~2015).

다. 본 연구에서는 월별 한파 발생 비율이 분석 기간 동안 시대별로 다소 차이가 있다(Figure 6).

1970년대부터 1990년대까지는 2월에도 한파가 발생하였지만 2000년대 이후에는 2월의 한파가 전혀 발생하지 않았다. 그리고 12월의 한파 발생 비율이 1990년대에 42.9%로 1980년대에 비하여 증가하더니 2000년대에는 63.6%, 2010년대에는 66.7%로 값이 지속적으로 증가하였다. 이는 겨울철 일최저기온의 가장 낮은 값의 출현이 1973~2012년까지는 1월 23~25일이었던 것이 최근 2003~2012년에는 1월 7일로 과거에 비하여 약 15~20일 앞당겨 나타난 것과 유사한 경향을 보인다(Moon *et al.*, 2014). 그러나 1990년대부터 최근까지 선정된 시대별 한파의 사례가 제한되어 있으므로 향후 지속적인 연구 분석이 필요할 것이다.

2) 한파 사례의 군집 분석

Figure 7은 한파 사례의 유사점과 기본 특성을 이용하여 한파 유형을 구분한 Dendrogram으로, 1973~2015년 동안의 한국에서 발생한 한파 사례는 총 5개의 군집으로 구분된다.

한파 사례 군집분석에 이용한 변수도 열파 사례의 경우와 같이 한파일 발생일의 특성을 표현하는 한파 시작일과 종료일 및 한파 지속기간, 한파 강도와 규모를 표현하는 관측지점 당 -12°C 이하 저온일의 초과 기온 편차와 한파 온도 규모(한파 시 지점별 최대 기온 편차값) 변수를 이용하였다. 또한 저온일 발생 관측 지점 수, 저온일 발생 상세기후 지역 수, 핵심 한파 지역 수 등의 다양한 변수값도 모두 표준화한 후 군집 분석에 이용하였다.

한파 특성을 이용하여 구분된 5개의 군집은 Table 5와 같다. A 군집은 분석기간인 1973~2015년 동안 5개의 군집 중 발생 빈도가 가장 빈번한 한파 특성을 나타낸다. 총 24회의 한파 사례 중 11회가 발생하였으나 특정 시대에 집중되지 않고, 월별로는 1월과 2월에 발생하였다. 다른 군집에 비하여 한파 강도와 규모, 지속 기간, 핵심 한파 지역 등 모든 변수에서 대부분 낮은 수치를 기록하였다.

B 군집은 A 군집 다음으로 발생 빈도가 높으며 12월에 발생한 한파 사례가 주를 이룬다. 지속기간이 가장 짧고 한파 강도 또한 -1.54°C 로 가장 낮

은 수치를 보인다. 그러나 핵심한파 지역 수는 A 군집에 비하여 값이 크다. 이는 1980년 12월 28일부터 12월 31일까지 발생한 한파 사례가 17개 핵심한파 지역을 포함하여 그 외 B 군집에 속한 한파 사례의 핵심 한파 지역이 대부분 0이었음에도 불구하고 상대적으로 높은 값을 나타냈다.

C, D, E 군집은 한파 사례가 2~3회로 발생 빈도가 높지 않다. C 군집은 1970년대 주로 발생한 한파 사례들로 12월 중하순에 집중되어 발생하였으며 지속 기간이 5.7일로 가장 길다. 또한 저온일 발생 지점이 가장 많으며 핵심 한파 지역 수도 비교적 높은 값을 보인다. D 군집은 1월에 발생한

한파 사례로 한파 강도가 가장 높은 수치를 보이고 E 군집은 저온일 발생 지역과 핵심 한파 지역이 가장 많은 군집으로 낮은 저온 현상이 전 지역에 걸쳐 발생하며 가장 광범위한 강한 한파 출현 특성을 나타낸다.

Figure 8은 한파 사례의 군집별 저온일의 기온 편차 합을 지점별로 표현한 것이다. Ics값이 가장 높은 군집의 분포도를 오른쪽에 위치하도록 순서를 정하였다. 열파 사례의 지점별 고온 분포도와 비교하였을 때 Ics값이 가장 높은 군집인 D 군집의 분포도를 살펴보면 저온일의 기온 편차 합의 분포가 전국적으로 높은 값을 보이지 않는다. 열파

Figure 7. Dendrogram of cold spell clusters.

Table 5. Mean characteristics of cold spells in individual cluster.

Cluster	Number of CSs	Ics	T	Duration	A
A	11	-3.3	-2.5	3.8	2.1
B	6	-1.5	-2.7	3.5	3.7
C	3	-5.6	-3.4	5.7	9.3
D	2	-11.0	-4.4	4.0	7.0
E	2	-7.7	-5.2	5.0	43.0

※ Ics, cold spell extremity index ($^{\circ}\text{C}$), T, temperature amplitude ($^{\circ}\text{C}$), A, spatial extent of the CS core (number), D, duration (days).

Figure 8. Cold spells by cluster analysis in South Korea during 1973~2015. Spatial patterns of the sum of negative Tmin deviations below the 5% quantile of winter Tmin distribution are plotted.

의 경우 지속기간과 열파 강도 모두 높은 수치인 군집 E의 핵심 열파 지역의 분포는 전 지역에 걸쳐 고르게 분포하였다. 그러나 한파 사례는 핵심 한파 지역을 표현할 수 있는 지점별 저온일 편차값의 합이 -10°C 이하인 지역의 분포가 군집별로 특정 지역에 집중되는 차이가 발생하였다.

Ics 값이 가장 낮은 B 군집은 한반도 서부 지역을 중심으로 상대적으로 강한 저온 현상이 분포하고 동부 지역과 남부 지역은 저온 편차의 합의 정도가 낮은 수치를 보였다. A 군집은 B 군집에 비하여 전 지역의 저온 편차의 합이 다소 증가하였으나 특정 지역에서 뚜렷하게 강한 저온 특성이 분포하지 않았다. C 군집은 핵심 한파 지역이라 할 수 있는 저온 현상이 강한 지역의 분포가 증가하며 특히 한반도 서부 지역에서 저온 지속기간이 상대적으로 높은 수치를 보이며 그 분포가 뚜렷하다. E 군집은 핵심 한파 지역의 분포가 가장 광범위하게 전 지역에서 출현하는 군집으로 다른 군집과 비교하였을 때 지속기간과 한파의 강도가 모두 상대적으로 높은 값을 보이며 분포에 영향을 미쳤다. D 군집은 Ics 값이 11.0으로 가장 높지만 핵심 한파 지역은 E 군집과 비교하였을 때 중북부 서부 지역

과 태백산맥과 소백산맥의 산지 지역을 중심으로 일부 지역에 분포하였다. 이는 열파의 군집별 고온 편차값 합의 분포가 특정 지역을 중심으로 나타나지 않고 전 지역에서 군집별로 강하거나 다소 약하게 일괄적인 특성을 보인다면 한파의 군집별 저온 편차값 합의 분포는 군집별로 지역의 특성을 포함한 다른 특징을 보인다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 1973~2015년 동안의 여름철 일최고기온과 겨울철 일최저기온의 $\pm 5\%$ 이상인 날이 3일 이상 지속적으로 발생한 경우를 각각 여름철 열파와 겨울철 한파로 선정하여 시공간적 특성을 분석하였다.

시대별 고온 발생일은 1970년대와 1980년대에 비하여 1994년을 제외한 1990년대 이후 수치의 감소가 명확하지만, 시대별 저온 발생일은 1970년대 이후 지속적으로 감소하는 경향이다가 2000년대 이후 다소 증가하였다. 분석기간의 월별 열파 발생 시기는 1970년대에는 7월에 집중되었다가 1980

년대 들어서 7월 하순과 8월 상순에 주로 집중되어 발생하였다. 1990년대에는 7월부터 9월까지 열파가 고루 발생하였고 1980년대에 비하여 특정 시기에 열파 발생 집중도가 낮아지며, 2000년대 이후에는 6월과 9월에도 열파가 발생함으로써 1970년대와 1980년대의 열파 발생 시기가 변화하였다. 한파의 월별 발생시기는 1970년대부터 1990년대까지는 2월에도 한파가 발생하였지만 2000년대 이후 2월 한파는 발생하지 않고 12월의 한파 발생 비율이 지속적으로 증가하였다.

열파와 한파의 발생일 및 종료일, 지속기간, 강도와 규모, 열파와 한파 발생 시 공간적 영향을 받는 범위 등의 다양한 변수를 이용한 결과 1973~2015년 동안의 열파와 한파 사례는 각각 5개의 군집으로 구분되었다. 군집별 열파 사례는 특정 지역을 중심으로 군집별 특징적인 폭염이 발생하기 보다는 열파의 강도와 규모에 의해 일괄적으로 한반도 전 지역에 강한 폭염이 출현하는 군집 또는 상대적으로 약한 폭염이 출현하는 군집으로 구분되었다. 반면에 군집별 한파 사례는 군집별로 한파의 강도와 주로 한반도 서부 지역의 집중적인 분포 또는 전 지역의 핵심한파 지역 분포 등에 의해 구분되는 특징을 확인할 수 있었다.

여름철 열파와 겨울철 한파는 각각 영향을 미치는 기단의 특성으로 인하여 북태평양 기단의 영향을 받는 여름철 열파의 경우 열파 출현 시 대부분 지역에서 유사한 폭염의 강도를 경험할 수 있지만, 시베리아 기단의 영향을 받는 겨울철에 발생하는 한파는 극한 저온 발생 정도에 따라서 특정 지역에 발생하는 핵심 한파 지역의 특성이 열파에 비하여 다양하였다.

본 연구에서 이용한 열파와 한파의 사례는 비교적 장기간에 발생하는 극한 기온 현상만을 사례로 선정하였으므로 단기간에 발생한 강한 고온 및 저온 현상에 대한 지역적 분석이 이루어지지 않았

다. 또한 관측지점 자료를 이용함으로써 열파와 한파의 영향을 받는 공간적 범위를 정량화하는데 어려움이 발생하였다. 따라서 향후 일자료로 제공되는 한반도 격자값을 추가분석하여 열파와 한파 사례별로 강도별 영향을 미치는 공간적 범위를 명확하게 표현할 수 있는 연구가 고려되어야 할 것이다. 또한 한파의 특성과 발생 경향을 파악할 때 2000년대 이후 발생한 한파 사례의 경우 출현 빈도가 낮으므로 한파의 강도별 기준을 다양화시켜 불안정한 최근 한파의 종합적 특성을 지속적으로 연구해야 할 것이다.

사사

이 논문은 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013 S1A3A2052995).

참고문헌

- Ballester, J., Rodó, X., and Giorgi, F., 2010, Future changes in Central Europe heat waves expected to mostly follow summer mean warming, *Climate Dynamics*, 35(7-8), 1191-1205.
- Barnett, A. G., Hajat, S., Gasparrini, A., and Rocklöv, J., 2012, Cold and heat waves in the United States, *Environmental research*, 112, 218-224.
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M., and García-Herrera, R., 2011, The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe, *Science*, 332(6026), 220-224.
- Beniston, M. B., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A. T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J.,

- Schöll, R., Semmler, T., and Woth, K., 2007, Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections, *Climate Change*, 81, 71-95.
- Brücker, G., 2005, Vulnerable populations: lessons learnt from the summer 2003 heat waves in Europe, *Euro Surveill*, 10(7), 147.
- Choi, G. W., Choi, J. N., and Kwon, H. J., 2005, The Impact of high Apparent Temperature on the Increase of Summertime Disease-related Mortality in Seoul:1991-2000, *J. Prev. Med. Public Health*, 38(3), 283-290 (in Korean).
- Choi, G. Y., 2006, A definition of Korean Heat Waves and Their Spatio-temporal Patterns, *Journal of Korean Geographical Society*, 41(5), 527-544 (in Korean).
- De Bono, A., Peduzzi, P., Kluser, S., and Giuliani, G., 2004, Impacts of summer 2003 heat wave in Europe, *UNEP/DEWA/GRID Eur. Environ. Alert Bull.*, 2, 1-4.
- Della-Marta, P. M., Luterbacher, J., von Weissenfluh, H., Xoplaki, E., Brunet, M., and Wanner, H., 2007, Summer heat waves over western Europe 1880-2003, their relationship to large-scale forcings and predictability, *Climate Dynamics*, 29(2-3), 251-275.
- Heo, I. H., 2006, The Distribution of Regional Unusual Temperature in Korea, *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, 12(4), 461-474 (in Korean).
- IPCC, 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., and Johnson, C. A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- IPCC, 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, 996 pp.
- 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, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jang, J. Y., 2009, Climate change and Health, *Environment & Life*, 59, 127-138 (in Korean).
- Jeong, J. H. and Heo, I. H., 2015, Estimating the Impact of Temperature Change on Electricity Consumption in Seoul, *Journal of Climate Research*, 10(2), 193-207 (in Korean).
- Jung, J. H., Kim, I. K., Lee, D. G., Shin, J. H., and Kim, B. J., 2014, Study on the Vulnerability Regarding High Temperature Related Mortality in Korea, *Journal of Korean Geographic Society*, 49(2), 245-263 (in Korean).
- Kim, J. U., Kwon, W. T., and Byun, Y. H., 2015, Monthly Changes in Temperature Extremes over South Korea Based on Observations and RCP8.5 Scenario, *Journal of Climate Change Research*, 6(2), 61-72 (in Korean).
- Korea Claim Adjuster Association, 2011, *A study for setting compensation standards of power outages*, Korea Claim Adjuster Association (in Korean).
- Kysely, J., 2010, Recent severe heat waves in central Europe: how to view them in a long-term

- prospect?, *International Journal of Climatology*, 30(1), 89-109.
- Lee, D. G., Byun, J. Y., Choi, Y. J., and Kim, K. R., 2010, Relationship between Summer Heat Stress (Perceived Temperature) and Daily Excess Mortality in Seoul during 1991-2005, *Journal of Korean Society of Atmospheric Environment*, 26(3), 253-264 (in Korean).
- Lee, S. H. and Heo, I. H., 2011, The Impacts of Urbanization on Changes of Extreme Events of Air Temperature in South Korea, *Journal of Korean Geographical Society*, 46(3), 257-276 (in Korean).
- Lee, S. H., Heo, I. H., Lee, K. M., and Kwon, W. T., 2005, Classification of Local Climate Region in Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 41(6), 983-995 (in Korean).
- Lhotka, O. and Kysely, J., 2015, Characterizing joint effects of spatial extent, temperature magnitude and duration of heat waves and cold spells over Central Europe, *International Journal of Climatology*, 35(7), 1232-1244.
- Moon, J. Y., Park, C., Choi, Y., and Pyeon, D., 2014, Recent Change in the Interseasonal Characteristics of Winter Temperature over south Korea, *Journal of Climate Research*, 9(3), 167-180 (in Korean).
- Park, C. Y., 2015, The classification of extreme climate events in the Republic of Korea, 2015, *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, 21(2), 394-410 (in Korean).
- Perkins, S. E. and Alexander, L. V., 2013, On the Measurement of Heat Waves, *Journal of Climate*, 26, 4500-4517.
- Robine, J. M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J. P., and Herrmann, F. R., 2008, Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003, *Comptes rendus biologiques*, 331(2), 171-178.
- Semenza, J. C., Rubin, C. H., Falter, K. H., Selanikio, J. D., Flanders, W. D., Howe, H. L., and Wilhelm, J. L., 1996, Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago, *New England journal of medicine*, 335(2), 84-90.
- Vavrus, S., Walsh, J. E., Chapman, W. L., and Portis, D., 2006, The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming, *International Journal of Climatology*, 26(9), 1133-1147.
- Wilkinson, P., Landon, M., Armstrong, B., Stevenson, S., and McKee, M., 2001, *Cold comfort: the social and environmental determinants of excess winter death in England, 1986-1996*, Joseph Rowntree Foundation.

책임편집: 이은걸
영문교열: 이은걸