

ORIGINAL ARTICLE

한반도 대도시의 폭염 및 열대야 발생 특성에 대한 연구

김은별 · 박종길^{1)*} · 정우식²⁾

인제대학교 대기환경정보연구센터, ¹⁾인제대학교 환경공학과, 대기환경정보연구센터,

²⁾인제대학교 대기환경정보공학과, 대기환경정보연구센터

A Study on the Occurrence Characteristics of Tropical Night Day and Extreme Heat Day in the Metropolitan City, Korea

Eun-Byul Kim, Jong-Kil Park^{1)*}, Woo-Sik Jung²⁾

Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea*

²⁾*Department of Atmospheric Environmental Information Engineering, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea*

Abstract

To identify the characteristics of extreme heat events and tropical nights in major cities, the correlations between automated synoptic observing station (ASOS), automatic weather station (AWS), and temperature in seven metropolitan areas were analyzed. Temperatures at ASOS were found to be useful sources of the reference temperature of each area. To set the standard for identifying dates of extreme heat events in relation to regional topography and the natural environment, the monthly and yearly frequency of extreme heat in each region was examined, based on the standards for extreme heat day (EHD), tropical night day (TND), and extreme heat and tropical night day (ETD). All three cases identified 1994 as the year with the most frequent heat waves. The frequency was low according to all three cases in 1993, 2003 and 2009. Meanwhile, the yearly rate of increase was the highest in 1994, followed by 2010 and 2004, indicating that the frequency of extreme heat changed significantly between 1993 and 1994, 2003 and 2004, and 2009 and 2010. Therefore all three indexes can be used as a standard for high temperature events. According to monthly frequency data for EHD, TND, and ETD, July and August accounted for 80% or more of the extreme heat of the entire year.

Key words : Extreme heat, Extreme heat day, Tropical night day, High temperature, Metropolitan area

1. 서론

최근 지구온난화와 도시열섬과 같은 도시화 현상이 복합적으로 작용함에 따라, 전 지구적으로 폭염으로 인한 인명피해 사례가 빈발하고 있다. 뿐만 아니라

향후 기후변화로 인해 고온 현상인 폭염이나 열대야의 발생빈도와 지속기간은 계속 증가하고, 그 강도 또한 심화될 것으로 예상된다(IPCC, 2007).

특히 한반도는 지난 100년간(1912-2008년) 6개 관측지점(서울, 인천, 강릉, 대구, 목포, 부산)의 평균 기

Received 3 February, 2014; Revised 17 March, 2014;

Accepted 28 March, 2014

*Corresponding author: Jong-Kil Park, Department of Environmental Engineering, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea
Phone: +82-55-320-3250
E-mail: envpjk@inje.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

온 상승률이 1.7°C로 전 지구 평균기온 상승률에 비해 높으며, 기온 상승값의 20~30%는 도시화 효과로 추정하고 있다. 뿐만 아니라 한반도의 기온은 1990년대를 기점으로 큰 폭으로 상승하고, 그 이후에도 꾸준히 기온이 증가하고 있다(NIMR, 2009).

고온 환경에 지속적으로 노출되면 인간은 인체의 체온조절 능력이 저하되고, 그로인해 관련 질병을 일으킬 뿐만 아니라, 열사병(heat stroke), 열탈진(heat exhaustion), 열실신(heat syncope), 열경련(heat cramps) 등의 고온 관련 질병이 발생하게 된다(Cinar 등, 2001; Park 등, 2006). 뿐만 아니라, 고온에 의한 직접적인 사인 외에 심혈관계 및 뇌혈관계에 간접적으로 영향을 미칠 수 있다(Park 등, 2008).

실제로 2003년 6월부터 8월까지 유럽에서는 40°C가 넘는 폭염과 열대야가 지속되면서 프랑스, 독일, 스페인, 이탈리아, 영국 등에서 총 35,000명이 사망하였다(Meehl과 Tebaldi, 2004). 이외에도 기후변화로 인한 이상기상현상의 빈도가 높아지면서 전 세계적으로 폭염에 의한 피해가 증가하므로, 폭염과 같은 고온 환경에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다. 이에 따라 국내에서는 대도시를 중심으로 고온 환경이 인체에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었지만, 이들 연구는 넓은 대도시 권역 내에서 한 지점에서 관측된 기상 자료를 이용하여 연구를 수행하고 있어, 해당 자료가 연구지역을 대표할 수 있는 지에 대한 검증이 이루어지지 않았다. 실제 고온 현상이 건강에 미치는 영향을 정확히 분석하기 위해서는 연구에 사용되는 기상자료가 대상지역을 대표할 수 있는 지에 대한 대표성 검증이 필요하다.

이에 본 연구에서는 선행연구에서 수행되지 않았던 지점의 대표성을 여러 가지 검증을 통해 각 지역의 기온 경향을 대표할 수 있는 지점을 밝히고, 이를 이용한 주요 도시의 폭염 및 열대야 발생특성을 분석하였다.

2. 자료 및 방법

고온 환경이 인체에 미치는 영향을 분석하기 위해 사용한 기상자료는 1991년부터 2010년까지 20년간의 지상기상관측자료(ASOS, Automated Synoptic

Observing Station)를 사용하였으며, 지점의 대표성을 검증하기 위해 사용한 자동기상관측자료(AWS, Automatic Weather Station)는 2001년부터 2010년까지 10년간의 자료를 사용하였다. 대부분의 AWS자료는 1995년부터 관측된 지점이 많았으나 공통적으로 비교 분석이 가능한 기간은 2001년 이후 10년간이었다. 그리고 지점의 대표성을 분석하기 위해 7개 대도시 권역과 9개의 광역자치체 권역으로 구분하였으며, 각 권역별 AWS지점 수는 Table 1과 같다.

선정된 ASOS와 AWS의 자료는 Larsen(1973)의 유효자료 검증을 만족하였으며, 기상관측자료의 항목은 기온, 습도, 해면기압, 풍속, 일조시간, 일사량이다. 기상관측자료 중 기온, 습도, 해면기압은 1일 8회 측정치(00LST, 03LST, 06LST, 09LST, 12LST, 15LST, 18LST, 21LST)를 사용하였고, 풍속, 일조시간, 일사량을 1시간 간격 측정치를 사용하였다.

Table 1. The numbers of automated synoptic observing stations and automatic weather stations by region used in this study

Regions	ASOS		AWS		Total
	1991 ~2010	2001 ~2010	1991 ~2010	2001 ~2010	
Seoul	1			25	26
Busan	1			10	11
Daegu	1			3	4
Incheon	1	1		15	17
Gwangju	1			4	5
Daejeon	1			3	4
Ulsan	1			5	6
Total	7	1		65	73

본 연구에서 사용한 폭염발생일의 기준은 현재 기상청에서 발령하고 있는 폭염특보 기준을 설정한 Park 등(2009)에 의해서 제안된 것이다. 선행연구(Jung 등, 2008; NIMR, 2007; Park 등, 2009)에 따라 연구기간동안 기온이 일최고기온의 95 percentile 이상이면서 열지수(heat index)가 27°C 이상인 날을 폭염발생일로 정의하였으며, 열대야발생일은 일최저기

온이 25℃ 이상인 날로 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대표지점 선정

7개의 대도시권역에 대한 분석을 수행하기에 앞서, 각 지역에서 선정되어 사용 중인 기온 자료가 그 지역의 기온을 대표할 수 있는 지를 파악하기 위하여 연구 기간동안 관측이 이루어진 ASOS 기온자료와 인근 지역의 AWS 기온자료를 바탕으로 그 관련성을 분석하고 그 결과를 Table 2에 제시하였다.

서울의 경우 Table 2에서 알 수 있듯이 기상관측지점 108지점을 제외하고 총 25개의 AWS에서 관측이 수행되고 있었다. 연구기간동안 서울에서 관측된 기

온의 평균값과 표준편차를 살펴본 결과, 평균기온이 가장 낮은 지점(116)은 8.8℃, 가장 높은 지점(510)은 13.9℃로 나타나, 두 지점의 차가 비교적 큰 5.0℃ 이었지만, 116지점은 관악산 레이더 기지(해발고도 634 m)로서 타 관측지점보다 높은 고도에 위치하여 지형적으로 다른 지점에 비해 기온이 낮게 나타났다. 이 지점을 제외한 다른 지점은 11.8~13.9℃ 사이에 분포하고 있었으며, 표준편차는 전 지점에서 10℃ 내외로 나타났다.

단순히 평균 기온의 차이만으로 서울의 기상관측지점(108)과 인근 AWS의 기온이 일치하는지를 설명할 수 없기 때문에 통계적 관련성과 유의성을 판단하기 위해 상관분석을 실시하였다. 그 결과 모든 지점에 대한 상관관계가 통계학적 유의성을 만족하고 있었

Table 2. Daily mean temperature and standard deviation at weather stations

Seoul			Busan			Daegu			Incheon		
1*	2**	3***	1	2	3	1	2	3	1	2	3
108	12.85	10.53	159	14.84	8.31	143	14.56	9.89	112	12.69	9.94
116	8.83	10.67	160	11.54	9.16	828	14.24	10.10	201	11.24	10.46
400	13.61	10.58	910	14.68	7.87	845	14.41	10.11	500	11.78	10.71
401	13.88	10.66	921	14.67	7.86	846	14.67	10.13	501	12.17	9.86
402	13.03	11.11	923	14.27	8.94				502	12.25	10.63
403	13.83	10.54	937	15.43	8.22				508	11.63	9.9
404	12.88	10.53	938	14.99	9.04				511	12.46	10.9
405	13.78	10.72	939	14.70	9.28				512	12.63	10.43
406	12.38	10.94	940	15.34	9.03				513	11.77	9.55
407	12.24	10.98	941	14.30	9.07				528	11.86	8.81
408	13.82	10.70	942	15.39	8.80				543	11.81	10.26
409	13.58	10.66							570	11.81	10.39
410	13.36	10.29							577	11.58	10.06
411	13.59	10.58							578	12.07	9.88
412	12.28	10.65							654	12.09	9.39
413	13.68	10.55							655	11.86	8.91
414	12.62	10.73							656	11.87	10.08
415	13.74	10.70	Gwangju			Daejeon			Ulsan		
416	12.95	10.55	1	2	3	1	2	3	1	2	3
417	13.54	9.96	156	14.19	9.78	133	13.10	10.33	152	14.52	9.03
418	13.71	10.58	708	13.66	10.22	642	13.56	10.53	900	13.97	9.50
419	11.75	10.70	722	14.33	9.49	643	12.45	10.78	901	14.49	7.95
421	13.66	10.38	783	13.94	10.23	648	12.85	10.86	924	14.40	7.83
509	11.76	10.70	788	13.78	10.27				943	16.00	9.02
510	13.86	10.71							949	14.43	8.95
590	12.67	10.68									

* station number
 ** mean
 *** standard deviation

고, 상관계수도 0.99로 나타나 매우 높은 상관을 나타내었다(Table 3).

부산시의 경우 Table 2에 나타내었는데, 기상관측 지점 159지점과 10개의 AWS에 대상으로 평균기온을 산정한 결과, 가장 기온이 낮은 지점(160)이 11.5℃이고, 가장 높은 지점(937)은 15.4℃이다. 부산도 서울과 마찬가지로 평균기온이 가장 낮게 나타난 160지점은 구덕산 레이더 관측소인 AWS의 관측 값으로 해발고도 517.79 m의 높은 고도에서 관측되어 비교적 낮은 평균기온을 나타낸다. 하지만 구덕산 레이더 관측소를 제외한 다른 지역은 14.3~15.4℃ 사이에 분포하고 있어 기온의 차가 거의 발생하지 않고 있다. 표준편차는 서울보다 1℃ 정도 낮게 나타나 대체로 9℃내외로 나타났다. 그리고 부산에서 관측 중인 지점에 대해

서도 상관분석을 실시한 결과 모든 지점이 지상기상 관측지점과 통계학적인 유의성을 만족하고, 0.97이상의 높은 상관계수를 보여 각 지점 기온의 상관성이 높음을 알 수 있었다(Table 3).

대구는 지상기상관측 지점 143지점과 3개의 AWS 관측에 대한 분석을 수행하였다(Table 2). 그 결과 평균기온이 가장 낮은 지점(828)과 가장 높은 지점(846)의 평균기온이 각 14.2℃와 14.7℃로서 서울과 부산에 비해서 그 차이가 더 적은 것을 알 수 있다. 표준편차는 전 지점에서 약 10℃로 나타났다. 대구 지상기상관측지점과 AWS의 상관계수는 통계적으로 유의하면서 모두 0.99이상으로 나타나 매우 높은 상관을 가짐을 알 수 있다.

이러한 결과는 인천, 광주, 대전, 울산에서도 모두

Table 3. Correlation coefficients between ASOS data and AWS data

Seoul		Busan		Daegu		Incheon		Gwangju		Daejeon		Ulsan	
1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**	1*	2**
108	1.00	159	1.00	143	1.00	112	1.00	156	1.00	133	1.00	152	1.00
116	0.99	160	0.99	828	0.99	201	0.99	708	0.99	642	1.00	900	0.99
400	1.00	910	0.99	845	1.00	500	0.99	722	0.99	643	0.99	901	0.96
401	1.00	921	0.99	846	1.00	501	0.98	783	0.99	648	1.00	924	0.97
402	0.99	923	0.97			502	0.99	788	0.99			943	0.99
403	1.00	937	0.99			508	0.99					949	0.98
404	1.00	938	0.99			511	0.99						
405	1.00	939	0.98			512	0.99						
406	0.99	940	0.99			513	0.98						
407	0.99	941	0.99			528	0.97						
408	1.00	942	0.99			543	0.99						
409	1.00					570	0.99						
410	1.00					577	0.99						
411	1.00					578	0.99						
412	1.00					654	0.99						
413	1.00					655	0.96						
414	1.00					656	0.99						
415	1.00												
416	1.00												
417	1.00												
418	1.00												
419	1.00												
421	1.00												
509	0.99												
510	1.00												
590	0.99												

* station number

** correlation coefficient

동일하게 나타났다. 즉, 관측소의 위치가 다르더라도 같은 권역 내에서 기온간의 상관성은 대체로 모두 통계적인 유의수준을 만족하면서 높은 상관성을 보임을 알 수 있다.

따라서 7개 대도시권역에서 관측되고 있는 ASOS의 기온이 인근 지역에서 관측되고 있는 AWS의 기온과 상관성이 있는지 정성적, 정량적 분석을 실시한 결과, 각 권역을 대표하는 ASOS 지상관측지점의 자료가 인근 지역의 자료와 관측기간 동안 높은 상관성을 나타내어 도시의 팽창과 더불어 관측 지점의 이동이 없는 한, 각 대도시별 기상관측지점의 자료를 그 지역의 대표 기온으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

3.2. Extreme heat day의 빈도분석

7개 대도시의 폭염 발생특성을 분석하기에 앞서 폭염일(extreme heat day, EHD)을 선행연구(KMA, 2007; Park 등, 2009)와 같이 정의하기 위해서 각 지역별로 일최고기온의 각 분위수를 정의한 결과 Table 4와 같다. 일최고기온의 최대값은 대구(38.8°C), 서울(38.3°C), 울산(38.0°C) 순으로 높았으며, 부산(35.7°C)이 가장 낮게 나타났다. 이는 위도에 의한 영향 외에 해륙분포 같은 지형적인 영향과 도시화 정도 및 이에 따른 국지규모의 기상현상에 의한 것으로 생각된다.

반면에 EHD의 선정기준이 되고 있는 일최고기온의 95 percentile 값은 대구(32.7°C), 울산(31.6°C), 광주(31.5°C) 순으로 크게 나타났고, 인천(29.6°C)에서

가장 낮게 나타났다. 현재 우리나라 전역의 폭염특보 기준이 되고 있는 서울 지역은 30.8°C로서 최고값에 비해서는 1.9°C 낮고, 최저값에 비해서는 1.2°C 높았다. 뿐만 아니라 최고기온이 가장 높은 지점인 대구와 가장 낮은 지점은 인천의 차이가 무려 3.1°C로 나타나, 각 지역 또는 권역별로 차이가 크게 발생함을 알 수 있었다. 이러한 지역적 차이로 인해 서울에서 발생하는 폭염발생 기준으로 EHD를 정의하게 되면, 서울에 비해서 폭염 기준값이 높게 나타나는 지역은 폭염특보의 발령빈도가 너무 빈번해지고, 그 반대의 경우에는 실제 폭염이 발생하더라도 제대로 대처할 수 없게 된다.

따라서 우리나라 EHD 선정기준은 서울의 일최고기온의 95 percentile 값을 사용하고 있으나, 실제로 지역마다 다르게 나타나고 있어, 비록 각 지역의 이격 거리는 짧지만, 복잡한 지형과 지역이 가지는 환경적 특성이 다르므로 EHD를 정확히 정의하기 위해서는 지역마다 다른 기준을 적용하는 것이 적합하다고 판단된다.

EHD 기준에 따라서 각 지역에 대한 연간 EHD의 발생빈도를 추정한 결과(Fig. 1), EHD의 발생빈도가 가장 높은 해는 7개 도시에서 모두 1994년으로 나타났으며, 두 번째로 높은 연도는 서울이 1997년, 부산과 광주는 2010년, 대구 1996년, 인천 2001년, 대전 2004년, 울산 1995년으로 지역마다 다소 다르게 나타났다. 세 번째로 높은 발생빈도를 나타낸 연도는 서울 2000년, 부산 2001년, 대구 1995년, 광주 2004, 인천

Table 4. Percentile of daily maximum temperature at weather stations

Percentile	Daily maximum temperature(°C)						
	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Gwangju	Daejeon	Ulsan
100%	38.3	35.7	38.8	36.4	37.1	36.9	38.0
99%	33.1	31.9	35.4	32.2	33.5	33.1	34.1
95%	30.8	29.8	32.7	29.6	31.5	31.1	31.6
90%	29.3	27.9	31.0	28.2	29.9	29.6	29.5
75%	25.7	24.5	26.9	24.7	26.5	26.2	25.3
50%	18.3	19.3	20.3	17.4	19.9	19.3	19.7
25%	7.7	12.3	10.8	7.5	10.5	9.1	11.7
10%	2.0	7.7	5.8	2.2	4.9	3.7	7.2
5%	-0.6	5.4	3.5	-0.2	2.6	1.4	5.0
1%	-4.9	2.1	0.3	-4.3	-0.6	-2.1	1.7
0%	-12.9	-3.1	-5.1	-11.6	-5.3	-8.1	-4.2

과 대전은 1997년, 울산은 1996년으로 나타나 지역별로 차이가 나타남을 알 수 있었다.

그리고 EHD의 연도별 발생 증가율이 지난해에 비해 크게 증가한 해는 1994년이 가장 높았고 그 다음이 2004년, 2010년으로 나타났으며, 1993년, 2003년, 2009년이 폭염발생 증가율이 낮게 나타났음을 알 수 있다.

이러한 결과가 발생한 것은 1994년과 같은 해는 이미 많은 선행연구에서 우리나라에서 폭염에 의해 피해가 발생한 대표적인 사례로 제시될 만큼 전국적으로 많은 피해가 발생하였기 때문에 전 지역에서 동일한 결과를 나타내었으나, 1994년 이외의 연도에는 폭염에 의한 영향이 전국적인 범위로 발생한 것이 아니기 때문에 그 당시의 지역적 기후특성에 따라 EHD의 발생빈도가 다르게 나타나는 것으로 판단된다.

따라서 EHD의 연도별 발생빈도는 1994년이 가장 높게 나타났고, 그 다음은 순위를 정할 수는 없으나, 대체로 1995년, 1996년, 1997년, 2001년, 2004년, 2010년이 다른 해에 비해 높게 나타났다. EHD의 발생빈도가 낮거나 '0'인 해는 대부분의 지역에서 1993년, 2003년, 2009년으로 나타났다. 그리고 폭염발생일의 연도별 증가율은 1994년에 가장 높게 나타났으며, 그 다음이 2004년, 2010년으로 나타나, 1993년과 1994년, 2003년과 2004년, 그리고 2009년과 2010년의 EHD 빈도가 대조적인 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

EHD의 월별 발생 빈도분포를 살펴보면(Fig. 2), 대부분의 지역에서 폭염은 5월부터 9월까지 발생하였

다. 7개 지역 모두 8월에 EHD의 발생빈도수가 가장 높았다. 다음으로 7월에 폭염이 발생하는 날이 많았다. 6월과 9월의 경우 EHD의 빈도가 지역에 따라서 다르게 나타나는데, 서울, 대구, 대전은 6월의 EHD 발생빈도가 9월보다 높게 나타났으며, 비교적 해안가에 위치하거나 해양이 영향을 받는 부산, 인천, 광주, 울산은 9월이 6월에 비해서 EHD 발생빈도가 높게 나타났다. 특히 부산의 경우에는 6월에는 EHD가 단 하루도 발생하지 않았지만, 9월에는 7개 지역 중에서 EHD의 발생빈도가 가장 높은 것을 알 수 있었다. 5월에는 서울, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산에서 EHD가 발생하였지만, 20년 동안 10회 미만으로 나타나 그 빈도수가 매우 낮음을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 7개 도시권역의 EHD는 5월부터 9월 사이에 발생하여 폭염이 발생하는 기간이 길어졌으며, EHD가 발생하는 기간 중에서 7월과 8월의 발생빈도가 전체의 86.37%로 나타나, 폭염이 발생하는 5개월 중에서 2개월에 집중되어 있음을 알 수 있었고, 월별 EHD의 발생빈도는 각 지역별로 유사한 경향을 나타내었다(Fig. 3). 특히 연간 EHD의 빈도수가 가장 높았던 1994년에도 7월과 8월에 집중적으로 폭염이 발생하고 있음을 알 수 있었다.

또한 폭염에 의한 피해 정도를 분석하거나, 폭염 피해에 대한 대책을 수립 할 때에는 폭염이 발생하는 전체 기간에 대한 분석이나 대책수립도 중요하지만, 특히 폭염이 집중되는 기간에 대한 특별 대책이 필요할 것이다. 특히 7월과 8월의 경우는 연중 기온이 가장

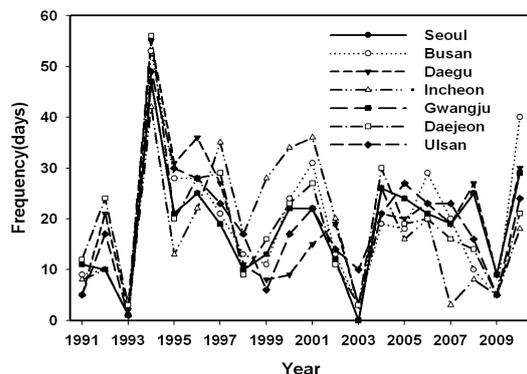


Fig. 1. Annual occurrence frequency of extreme heat day during 1991~2010.

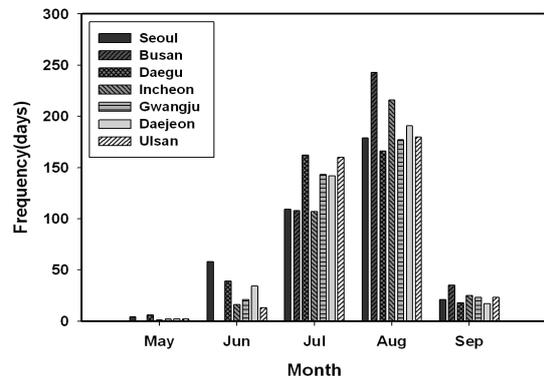


Fig. 2. Monthly occurrence frequency of extreme heat day during 1991~2010.

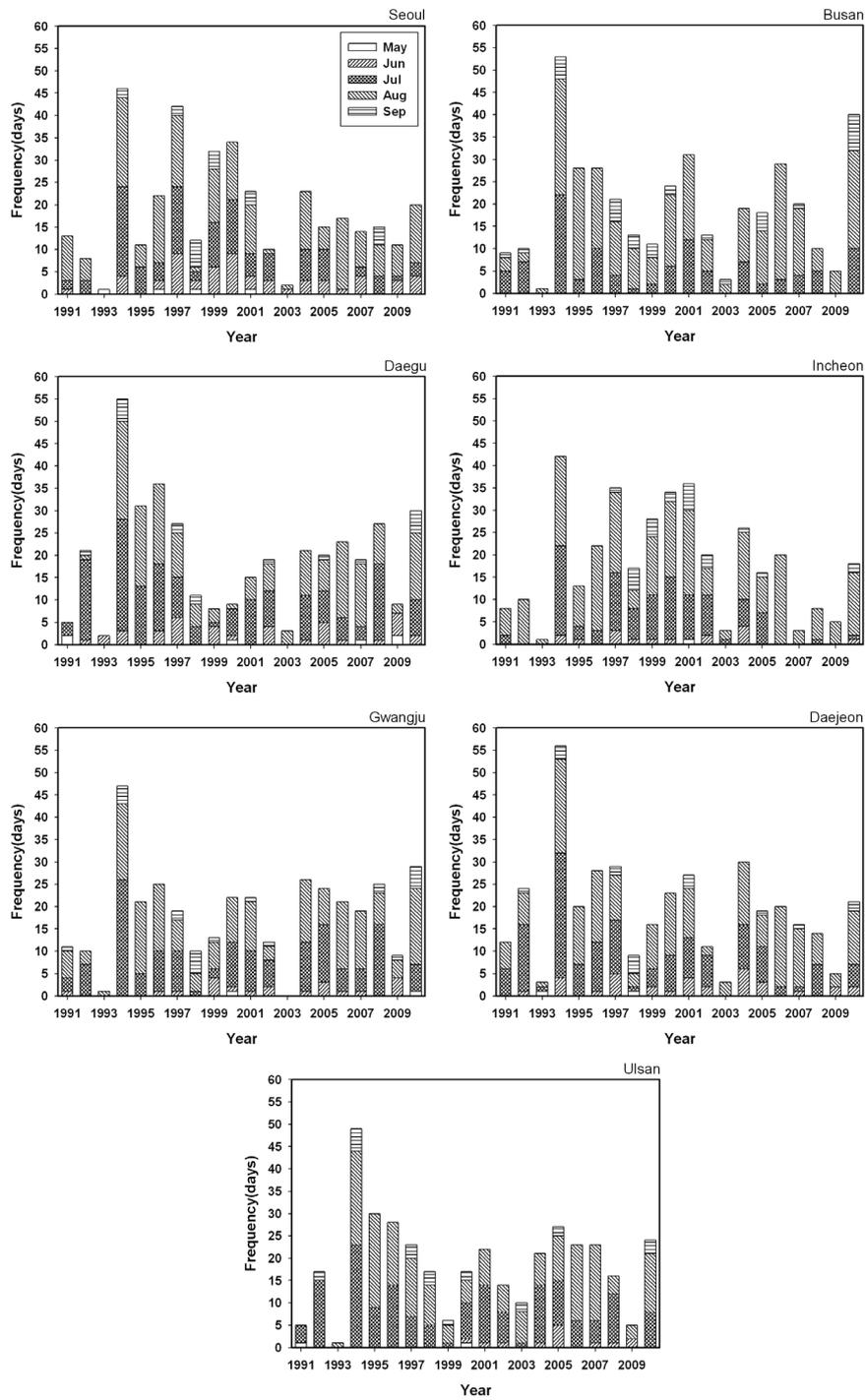


Fig. 3. Annual and monthly occurrence frequency of extreme heat day during 1991~2010.

높은 시기와 일치하기 때문에 특히 폭염에 관해서는 가장 중요한 시기이다. 또한 기후변화로 인해서 기온이 상승함으로써 점차 겨울과 여름 사이의 기간이 짧아지고 있으므로 비록 발생빈도는 적으나 6월 또는 5월의 EHD에 대해서도 관심을 가져야 할 것이다.

따라서 EHD의 월별 발생 빈도는 주로 5월에서 9월 사이에 발생하나, 대부분의 지역에서 7월과 8월에 가장 빈도수가 높게 나타났음을 알 수 있으며, 그 다음은 비교적 내륙에 위치해 있는 지역은 6월, 해양의 영향을 많이 받는 지역은 9월에 빈도수가 높게 나타남을 알 수 있다.

열대야발생일(topical night day, TND)은 일최저기온이 25°C 이상인 날로 정의되며, 지역별 연간 발생 빈도수는 Fig. 4와 같다. TND의 연간 발생빈도가 가장 높았던 해는 EHD와 마찬가지로 대부분의 지역에서 1994년으로 나타났다. 두 번째로 높은 빈도를 나타낸 해는 서울, 부산, 대구, 광주, 광주의 경우 2010년이었으며, 인천, 대전, 울산은 1995년으로 나타나 지역별 다소 차이가 있었다. 세 번째로 빈도가 높은 해는 서울은 1995년과 1997년이고, 부산, 대구, 인천은 2001년, 광주는 1995년, 대전은 1996년, 울산은 1998년, 2008년, 2010년으로 나타나 지역에 따라 다르게 나타났으며, 발생빈도가 아주 낮은 해는 1993년, 2003년, 2009년으로 나타났다.

그리고 열대야발생일의 연도별 발생 증가율이 지난해에 비해 크게 증가한 해는 1994년이 가장 높았고 그 다음이 2010년, 2004년으로 나타났으며, 1993년, 2003년, 2009년 순으로 열대야발생 증가율이 낮게 나

타났음을 알 수 있다.

따라서 TND의 발생빈도가 가장 많았던 해는 EHD와 마찬가지로 1994년으로 나타났으며, 대부분의 지역에서 1995년, 2000년, 2010년에 TND의 발생빈도가 높은 해로 나타났다. 이에 비해 TND의 빈도가 낮은 해는 1993년, 2003년, 2009년으로 나타났으며, EHD와 유사한 분포를 나타내었다. 특히 1993년과 1994년, 2003년과 2004년, 그리고 2009년과 2010년은 TND가 대조적인 경향을 나타내었고, 폭염발생일의 경우와 유사한 경향을 나타내었다.

TND의 월별 빈도 분포를 살펴보면(Fig. 5), 5월에는 모든 지역에서 열대야가 발생하지 않았고, 6월에는 대구에서 5일, 울산에서 1일 열대야가 발생하였다. 7월과 8월에는 EHD와 동일하게 TND가 집중되었으며, 전체 중 96.87%가 이 기간 동안 발생하였다. 즉, 열대야는 주로 7월과 8월에 발생하며, 이는 EHD가 86.37% 집중된 것에 비해서 약 10% 더 많은 빈도수를 나타내었다.

이러한 월별 열대야발생일 빈도수의 특성은 각 지역별 연간 월별 빈도수의 결과에서도 동일하게 나타나고 있다(Fig. 6). 대부분의 지역에서 2010년 9월에 열대야가 발생한 것을 제외하면, 거의 7월과 8월에 열대야가 집중적으로 발생한 것을 확인할 수 있었다.

따라서 TND의 월별 발생 분포는 EHD의 경우와 마찬가지로 대부분의 지역에서 7월과 8월에 집중되어 나타났으며, 8월이 7월에 비해 높은 빈도를 나타내었음을 알 수 있다.

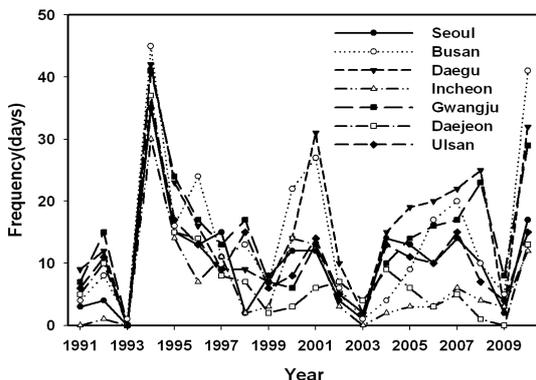


Fig. 4. Annual occurrence frequency of tropical night day during.

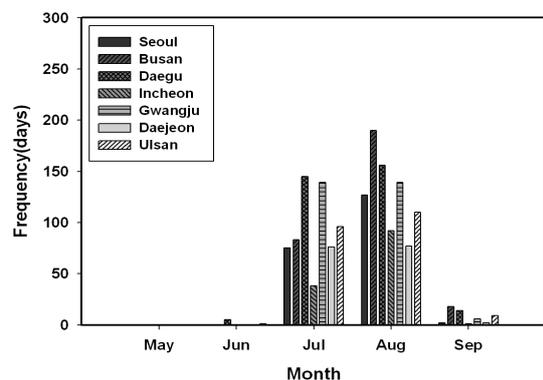


Fig. 5. Monthly occurrence frequency of tropical night day during 1991-2010.

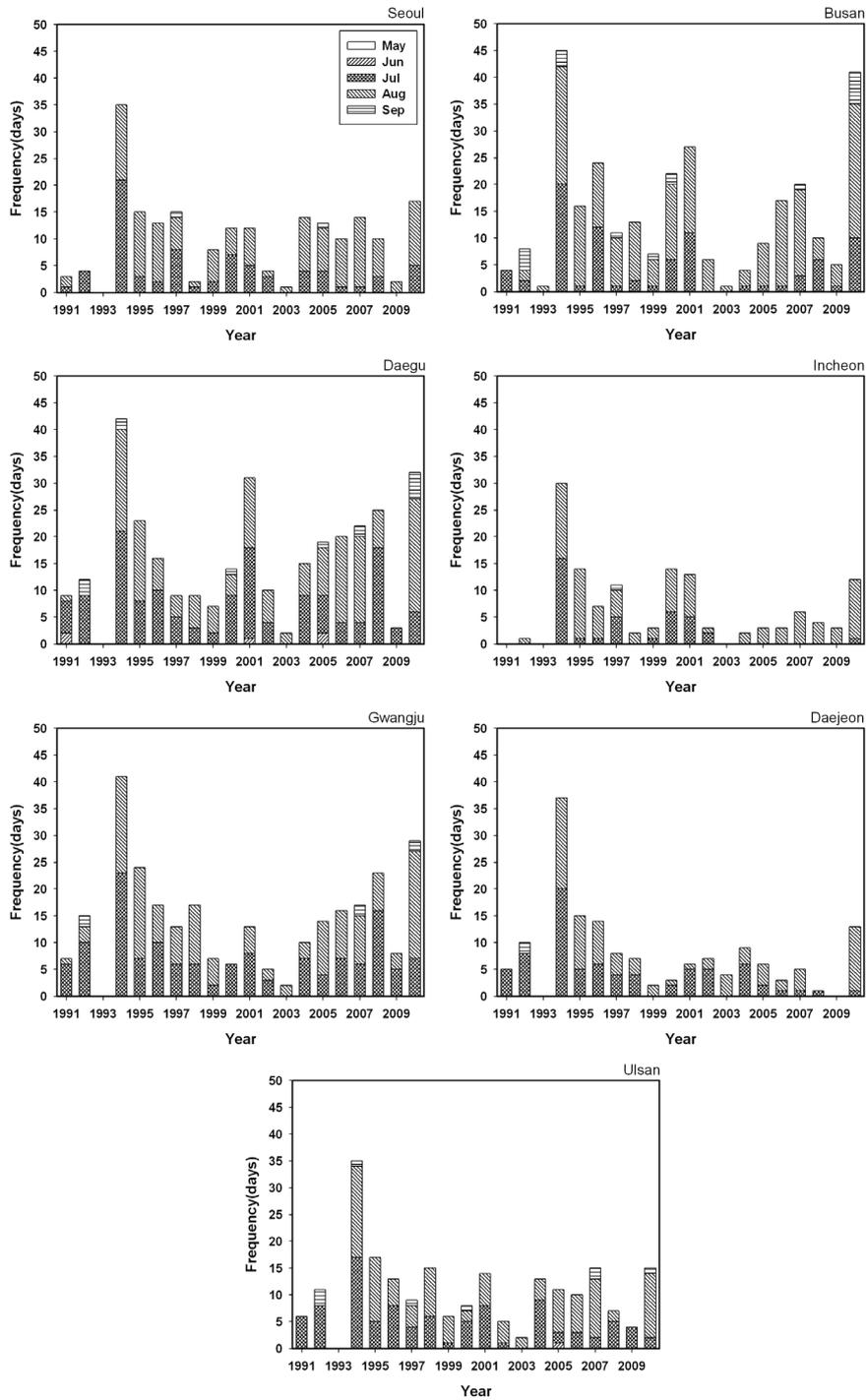


Fig. 6. Annual and monthly occurrence frequency of tropical night day during 1991~2010.

3.4. Extreme heat와 tropical night day의 빈도분석

앞서 살펴본 EHD의 빈도수는 지역적 특성을 잘 반영하고 있지만, 너무 빈번하게 발생하고 있다. 특히 폭염에 의한 피해가 높았던 1994년의 경우 대구지역에서는 7월과 8월의 총 62일 가운데 55일이 EHD이었다. 이는 향후 본 연구에서의 기준을 이용하여 폭염특보를 운영하게 될 경우 그 발생빈도가 빈번해져서 특보가 가지는 의미가 퇴색될 수 있는 단점이 있다.

TND의 빈도수는 EHD에 비해서는 전국적으로 유사한 경향을 나타내고 있으나, 우리나라는 이미 기후변화로 인해서 한반도의 남부지역은 아열대기후, 그리고 그 외 지역은 온대기후가 나타나는 등 동시에 여러 기후가 나타나기 때문에 전국을 동일한 기준으로 분류하는 것은 적합하지 않다(Park 등, 2008; 2009).

이에 따라 본 연구에서는 일최고기온을 이용하는 폭염발생일의 기준과 일최저기온을 사용하는 열대야 발생일의 기준을 동시에 적용해 보고자 한다. 이에 대한 근거는 고온 환경에 의해서 인체가 영향을 받는 경우, 야간의 기온이 높아서 숙면을 취하지 못하게 되면 다음날 활동에 지장이 있을 뿐만 아니라, 이러한 피로누적으로 인해서 thermal stress를 받게 되며(Cho 등, 2000), 다시 고온 환경에 노출될 때 그 영향정도가 더 크게 나타난다. 그리고 하루 중 고온에 의한 직접적인 피해를 가장 크게 받을 수 있는 시간은 태양복사에너지량이 가장 많은 낮 12시부터 일최고기온이 나타나는 오후 2~3시경이다. 이와 같은 일최고기온과 일최저기온과 같은 두 가지 요소를 모두 고려할 경우 고온

에 의한 영향에 대한 상관정도도 더 상승할 것으로 판단된다.

폭염과 열대야가 동시에 발생한 날(extreme heat and tropical night day, ETD)에 대한 지역별 연간 발생빈도를 살펴보면(Fig. 7), EHD나 TND와 동일하게 전체 20년의 기간 중에서 1994년의 발생빈도가 가장 높게 나타남을 알 수 있었다. 이를 통해서 여러 가지 다른 기준 적용 시에도 발생빈도가 가장 높았던 1994년은 연구기간 내에서 가장 고온에 의한 피해도 높게 나타날 것으로 예상되었다.

그 다음으로 ETD의 빈도가 높았던 해는 서울의 경우 1997년, 2004년, 부산과 대구는 2010년, 인천은 2000년, 광주와 울산은 1995년, 대전은 1996년으로 나타났으며, 세 번째로 ETD 발생 빈도가 높은 해가 서울은 1996년, 부산, 인천, 광주, 울산은 2001년, 대구는 1995년, 대전은 2010년으로 나타나 지역별로 차이가 남을 알 수 있었다. 또한 가장 빈도가 낮게 나타난 해는 지역에 따라 다소 차이는 있으나, EHD, TND와 마찬가지로 1993년, 2003년, 2009년으로 나타났다.

그리고 ETD의 연도별 발생 증가율이 지난해에 비해 크게 증가한 해는 EHD, TND와 마찬가지로 1994년이 가장 높았고 그 다음이 2010년, 2004년으로 나타났으며, 1993년, 2003년, 2009년이 ETD의 발생 증가율이 낮게 나타났음을 알 수 있다.

ETD는 EHD의 발생빈도가 높은 해와 유사하였지만 TND의 발생빈도가 높은 해와는 다소 차이가 나타남을 알 수 있었는데, 이렇듯 1994년을 제외한 기간에

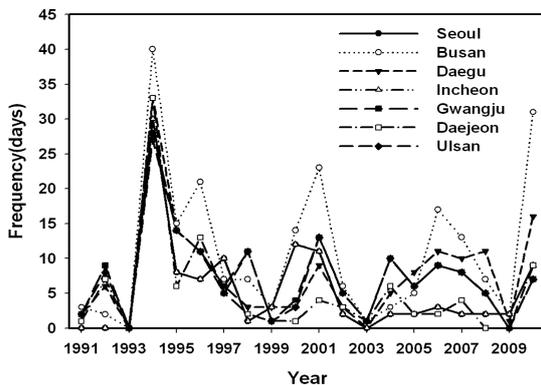


Fig. 7. Annual occurrence frequency of extreme heat and tropical night day during 1991~2010.

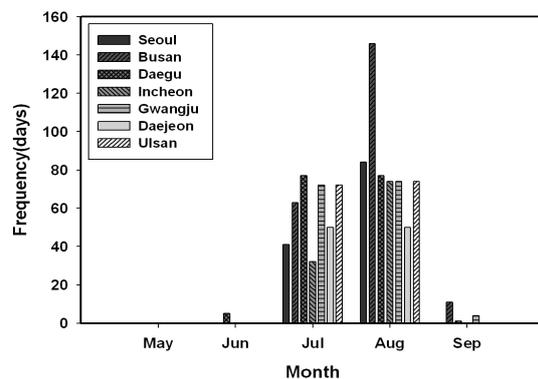


Fig. 8. Monthly occurrence frequency of extreme heat and tropical night day during 1991~2010.

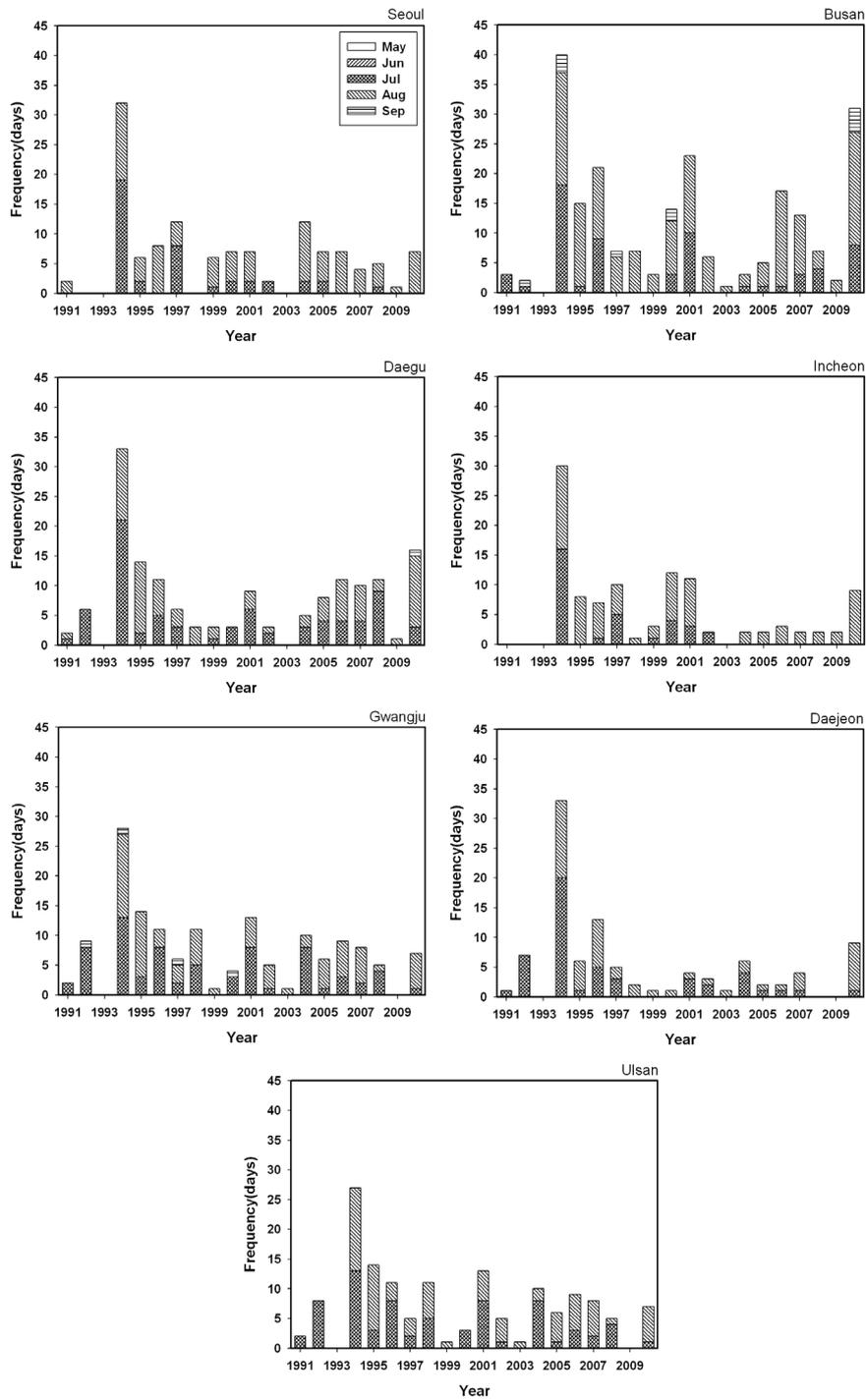


Fig. 9. Annual and monthly occurrence frequency of extreme heat and tropical night day during 1991~2010.

지역별 EHD, TND, ETD에 대한 발생빈도의 차이가 나타나는 원인 중 가장 중요한 것은 6월과 7월에 한반도에 집중적으로 영향을 미치는 장마의 영향과 8월에 나타나는 대류성강우 현상에 의한 것으로 판단되며, 6월부터 7월 중순까지 장마전선에 의해 우리나라의 중부, 남부지역에서는 강수가 발생함을 확인할 수 있다(KMA, 1991~2010). 또한 8월에는 지역에 따라 다르지만 대류성 강수로 인한 집중호우가 자주 나타난다. 특히 장마 기간에 정체전선이 위치하는 지역의 경우 광범위하게 장기간 강수가 발생하여 고온의 영향을 받지 않지만, 그 외 지역에서는 고온의 영향이 나타날 수 있다.

따라서 폭염과 열대야가 동시에 발생한 ETD는 EHD나 TND와 마찬가지로 1994년이 가장 발생빈도가 높았던 해이며, 그 다음은 순서에 관계없이 1995년, 1996년, 2001년, 2010년이 대체로 높게 나타났다. ETD의 발생빈도가 낮았던 해는 지역에 따라 다소 차이는 있으나, EHD와 TND와 마찬가지로 1993년, 2003년, 2010년으로 나타나 두 기준과 마찬가지로 ETD는 고온 현상에 대한 피해를 줄이기 위한 기준으로 활용할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 ETD의 연도별 증가율도 다른 두 기준과 마찬가지로 1994년에 가장 높게 나타났으며, 그 다음이 2010년, 2004년으로 나타나, 1993년과 1994년, 2003년과 2004년, 그리고 2009년과 2010년의 ETD의 빈도가 대조적인 경향을 나타내고 있었다.

각 지역의 폭염과 열대야 동시발생일의 월별 빈도수를 살펴본 결과(Fig. 8), 6월은 대구에서 5회, 9월은 부산에서 11회, 대구에서 1회, 광주에서 4회만 발생하였다. 그 외는 모두 7월과 8월에 발생하였으며, 서울, 부산, 인천에서는 8월의 발생빈도수가 높았고, 그 외의 지역에서는 7월과 8월의 발생빈도수에 차이가 없었다. 이상의 결과를 통해서 폭염과 열대야 동시발생일의 빈도수도 여름철 기간 중 특히 7,8월에 집중되어 있으므로 이 기간에 대한 사망자 발생에 대한 추가적인 분석이 필요하다고 생각된다.

이러한 현상은 중국 대도시인 북경에서도 유사한 경향을 나타내었다(Park 등, 2012). 단, 6월의 경우 현재까지 우리나라의 기후특성상 장마의 영향에 의해서 강수일이 빈번하게 발생하여 고온에 의한 영향이 거

의 나타나지 않았으나, 향후 기후가 변화함에 따라 점차 6월과 7월에 발생하던 장마의 기간이 짧아지고 대류성 강우현상이 빈번해지며, 우리나라 계절의 특성상 여러 지역에서 여름철이 길어지고 있는 것을 고려한다면 지속적인 관심이 필요하다. 이러한 월별 발생 경향은 지역별 연간 월별 발생빈도수 분포 그래프에서도 확인해 볼 수 있다(Fig. 9).

4. 결론

한반도 주요 도시의 폭염 및 열대야 발생 특성을 파악하기 위하여 먼저 7개 대도시 권역별 ASOS 지점의 대표성을 정성적, 정량적으로 분석한 결과, ASOS 지점과 주변 AWS 지점의 기온은 큰 차이를 나타내지 않았으며, 상관계수도 높게 나타나(Table 3), ASOS 지점의 기온을 각 권역별 대표 기온으로 사용할 수 있음을 알았다.

그리고 폭염일의 선정기준인 서울의 일최고기온의 95 percentile 값을 사용하고 있으나, 서울을 포함한 7개 대도시가 각각 다른 값을 나타내었으며, 도시별 복잡한 지형과 지역이 갖는 환경적 특성이 다르므로 폭염발생일 기준을 권역별로 다르게 적용하는 것이 적합함을 알 수 있었다.

권역별 EHD, TND, ETD의 기준에 따라 각 지역의 연별, 월별 발생빈도를 살펴본 결과, 세 기준 모두 1994년에 발생빈도가 가장 높게 나타났으며, 그 다음의 순위는 지역에 따라 다소 차이가 있었다. EHD, TND, ETD의 빈도가 모두 낮게 나타난 해는 1993년, 2003년, 그리고 2009년으로 나타났으며, 이들의 연도별 증가율은 1994년에 가장 높게 나타났으며, 그 다음이 2010년, 2004년으로 나타나, 1993년과 1994년, 2003년과 2004년, 그리고 2009년과 2010년에 이들의 빈도가 대조적인 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었으며 고온 현상에 대한 기준으로 세 가지 모두 활용할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 EHD, TND, ETD의 월별 발생빈도는 7월과 8월에 전체 발생 빈도의 80% 이상이 집중되어 나타나는 것을 알 수 있었다.

그러나 고온 현상의 발생빈도가 높은 해 중 1994년을 제외하고는 EHD, TND, ETD의 발생빈도가 높은 해의 경우 세 기준에 따라서 일치하는 해도 있었지만

그렇지 않은 해도 있었으며, 대부분의 지역에서 발생 빈도가 높다고 하더라도 그 해의 종관적인 기상상황에 의해 지역에 따라 다른 경향을 나타낼 수 있기 때문에 보다 자세한 분석이 필요하며, 특히 각 기준별 대조를 이루는 연도에 대한 종관분석을 통해 폭염 현상의 원인과 특성을 밝힐 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2013년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (2013-065891).

참 고 문 헌

- Cho, K. J., Lim, I. S., Kim, J. H., 2000, The effect of overload exercise and sleep deprivation on the changes of performance, EEG, and stress hormone while sleeping. *The Korean Journal of Physical Education*, 32(2), 434-444. (In Korean with English abstract).
- Cinar, Y., Senyol, A. M., Duman, K., 2001, Blood viscosity and blood pressure: role of temperature and hyperglycemia. *American Journal of Hypertension*, 14, 433-438.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis, Summary for Policymakers, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 1-21.
- Jung, W. S., Park, J. K., Kim, E. B., Song, J. H., 2008, Study on the Establishment of Threshold Criteria for Heat Health Watch Warning System in Korea; Part II: Improvement of Criteria, *Journal of Environmental Sciences*, 18(7), 781-796. (In Korean with English abstract).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (1991 ~ 2010) *Annual climatological report* (Korean).
- Larsen, R. L., 1973, An air quality data analysis system for interrelating effects, standards and needed source reductions, *JAPCA*, 23, 933.
- Meehl, G. A., Tebaldi, C., 2004, More intense, more frequent and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686), 994-997.
- National Institute of Meteorological Research(NIMR), 2007, *Study on the extreme heat health watch warning system(II)*. Inje University (Korean).
- NIMR, 2009, *Understanding of Climate change II*. National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration (Korean).
- Park, J. K., Cho, D. H., Yoon, S. H., Lee, J. T., Seok, K. H., Jung, W. S., Kim, E. B., Jeon, D. G., 2006, Development of Weather-Related Health Impact Index for the Cutaneous disorder. *Proceedings of the 15th IUAPPA Regional Conference, Lille, France*. Paper No. 021609.
- Park, J. K., Jung, W. S., Kim, E. B., 2008, A Study on the Influence of Extreme Heat on Daily Mortality. *J. of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(5), 423-537 (In Korean with English abstract).
- Park, J. K., Jung, W. S., Kim, E. B., 2009, Study on the Establishment of Threshold Criteria for Heat Health Watch Warning System in Korea; Part I : Establishment of Criteria and Verification. *Journal of the Environmental Sciences*, 18(7), 767-780 (In Korean with English abstract).
- Park, J. K., Lu R. Y. Li, C. F. Li, Kim, E. B., 2012, Interannual Variation of Tropical Night frequency in Beijing and Associated Large-Scale Circulation Background, *Advances in Atmospheric Sciences*, 29(2), 295-306.