

## 한국 주요도시의 폭염에 대한 기후 순응도 특성

김지영<sup>1,\*</sup> · 이대근<sup>1</sup> · Jan Kysely<sup>2</sup>

<sup>1</sup>기상청 국립기상연구소

<sup>2</sup>Institute of Atmospheric Physics

(2009년 8월 28일 접수; 2009년 11월 3일 승인)

## Characteristics of Heat Acclimatization for Major Korean Cities

Jiyoung Kim<sup>1,\*</sup>, Dae-Geun Lee<sup>1</sup> and Jan Kysely<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Republic of Korea

<sup>2</sup>Institute of Atmospheric Physics AS CR, Prague, Czech Republic

(Manuscript received 28 August 2009; in final form 3 November 2009)

### Abstract

Vulnerability to heat was examined for populations of 6 major cities in South Korea (Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Daegu, and Busan). Daily excess mortality and maximum temperature from 1991 to 2005 were employed in this study. The results show that the standardized mortality increase associated with a 1 °C increase in daily maximum temperature above the city-specific threshold explains the heat acclimatization effect better than the threshold temperature itself. The estimated increase in mortality (standardized per 10 million population) associated with a 1 °C increase in temperature above the threshold is 4.8 in Incheon, 4.7 in Seoul, 4.3 in Daejeon, 2.8 in Gwangju, 2.4 in Daegu, and 1.5 in Busan, well reflecting the latitudinal locations and local climates of each city. Climate models project more frequent, more intense, and longer lasting heat waves in most land areas in both hemispheres in the 21st century under increasing greenhouse gas concentrations. In order to mitigate the adverse human health impacts due to excess heat, more detailed characteristics of acclimatization to heat need to be understood and quantified.

**Key words:** Heat waves, Human biometeorology, Acclimatization, Climate change, Excess mortality

### 1. 서론

전지구적 기온 상승에 따라 여름철 폭염의 발생빈도가 높아지고, 강도가 커지며, 지속시간이 길어지고 있고, 이러한 경향은 21세기에 대부분의 육상지역에서 지속될 것으로 예측되고 있다(Meehl *et al.*, 2000; Chase *et al.*, 2006; IPCC, 2007; 김지영 등 2007). 지속적인 가뭄 등에 동반된 장기간의 폭염은 다양한 사회경제적 피해를 야기 시킨다(Fink *et al.*, 2003; Ebi *et al.*, 2004; 김지영 등 2006). 특히, 폭염 발생 시 닭이나 오리 등 조류의 집단 폐사, 정전 등 전력공급 문제 야

기, 산불의 발생, 광화학 스모그로 인한 대기오염 악화 등으로 인한 피해가 크게 증가하게 된다(Changnon *et al.*, 1996). 국내외의 다양한 폭염 사례를 통해 널리 알려진 바와 같이 폭염은 인류의 보건에도 심각한 영향을 미치고 있다(Curriero *et al.*, 2002; Ebi *et al.*, 2004; Kysely and Kim, 2009; 이대근 등, 2007).

폭염은 인체 내의 생리적 변화와 연관되어 있기 때문에 인간의 유병률(morbidity) 및 사망률(mortality) 증가와 직접적인 관련성을 갖게 된다(Kysely *et al.*, 2009). 하지만, 비록 같은 강도의 폭염일지라도 폭염에 따른 피해 정도는 각 도시별 기후 특성에 따른 주민의 폭염에 대한 적응 정도에 따라 달라질 수 있다(Kim *et al.*, 2006; Baccini *et al.*, 2008; De Freitas and Grigorieva, 2009). 실제로 미국에서의 연구결과에 따르면(Kalkstein, 2003), 보건에 영향을 미치는 임계기온(일 최고기온의 증가에 따라 사망률이 증가하기 시작하는 온도)은 도

\*Corresponding Author: Jiyoung Kim, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Republic of Korea.  
Phone: +82-2-6712-0235, fax: +82-2-849-0668  
E-mail: jykim@kma.go.kr

시에 따라 서로 달라 미국 북동부에 위치한 보스턴은 30℃, 아틀란타는 32℃, 달라스는 40℃, 덴버는 34℃, 미국 남서부의 사막지역인 피닉스는 44℃ 등으로 최고 14도 정도로 차이가 나는 것으로 알려져 있다. 지역에 따른 주민의 기후에 대한 적응 정도를 객관적으로 비교하기 위해 열적 기후 순응도(heat acclimatization)를 사용한다. 여러 가지 문헌조사에 따르면, 열적 기후 순응(또는 순응도)는 “열 손상으로부터 생리학적 스트레스인(심박동수, 체온 등)을 줄이고, 물리적 활동능력을 개선시키며, 생명유지에 필요한 기관(뇌, 간, 신장, 근육 등)의 쾌적성을 개선시키고 보호하려는 생물학적 적응(adaptation)”으로 정의된다(U.S. Army, 2003; Encyclopedia of Entomology, 2004). 특히, 실험실에서 이루어지는 급격한 실험환경 변화에 따른 순응도(acclimation)와 자연환경에서 장기간의 환경변화에 따른 기후 순응도(acclimatization)는 서로 개념적 차이가 있다(Wyndham *et al.*, 1954 and 1960; Cleland *et al.* 1969; Li *et al.*, 1995; Mathew *et al.*, 2000).

폭염으로 인한 인명 피해를 최소화하기 위해서는 폭염의 발생(Kim *et al.*, 2007; 김지연과 이승호, 2007) 및 그에 따른 초과 사망자 연구(Kysely and Kim, 2009; 최광용 등, 2005; 김지영 등, 2006; 이대근 등, 2007; 박종길 등, 2008b) 뿐만 아니라 각 지역 별 주민의 폭염에 따른 기후 순응도를 조사할 필요가 있다. 이러한 연구는 폭염에 대비한 기상 예보 및 특보 시스템의 개발과 개선(기상청, 2006; 박종길 등, 2008a), 고온-건강 경보시스템의 개발(Kalkstein *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2008)등에 많은 도움을 줄 수 있다. 그러나, 지금까지 폭염에 대한 지역 별 기후 순응도를 조사한 연구는 매우 드문 실정이다.

이 연구는 1991년부터 2005년까지 한국의 6개 대도시(서울, 인천, 대전, 대구, 광주, 부산)에 대한 일 사망률과 기온관측 자료의 분석을 통하여 각 도시 별 주민의 폭염에 대한 기후 순응도 특성을 밝히고자 수행하였다.

## 2. 폭염의 정의, 자료 및 연구방법

### 2.1 폭염의 정의

폭염에 대하여 국제적으로 합의된 정의는 아직 없으며, 연구자에 따라 사용되는 정의가 서로 다르며, 폭염을 나타내는 열적지수도 연구자 마다 각각 다르다

(Kalkstein *et al.*, 2003; Ebi *et al.*, 2009). 기온 측정값(일 평균 기온 또는 일 최고기온) 자체를 사용하는 경우도 있고, 기온과 습도의 조합으로 이루어진 열지수(Heat Index)나 Apparent Temperature를 사용하는 경우도 있다(최광용 등, 2005; Kim *et al.*, 2006; Baccini *et al.*, 2008). 또한 일본과 독일에서는 바람과 일사의 효과를 함께 고려한 흑구습구온도(Wet Bulb Globe Temperature)나 인지온도(Perceive Temperature)를 각각 쓰는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서는 어느 날의 일 최고기온이 임계온도(즉, 기온의 증가에 따라 초과 사망자가 발생하기 시작하는 일 최고기온값)를 초과한 경우를 폭염 발생일로 정의하여 사용하였다. 실제로 인체에 미치는 열 스트레스를 산정하고 분석할 때 습도에 의한 효과를 함께 고려하는 것이 더 적절한 경우가 많으나, 일기예보 현업에서 폭염의 강도와 지속기간을 예측할 때 습도(이슬점온도 또는 상대습도)를 정확하게 예측하기는 어려운 것으로 알려져 있다(기상청 유근기 예보관 개인교신). 따라서, 현업적으로 활용이 가능한 연구를 하기 위해서는 기온 자료를 중심으로 분석하는 것이 현실적일 수 있다.

### 2.2 자료 및 연구방법

이 연구에 사용된 주요 대도시의 일 별 사망자 수 자료는 통계청에서 발간한 1991년부터 2005년까지 15년 동안의 사망원인 별 통계 자료를 사용하였다(통계청, 2006). 사망원인 별 통계 화일에는 사망자의 나이, 성별, 지역이 구분되어 있다. 사망원인은 세계보건기구(World Health Organization, 이하 WHO)의 권고에 따른 국제사인분류 기준, 즉 국제 질병 구분(International Classification of Diseases- Revision 10, 2003년 발간)에 따라 분류되어 있다. 일 별 사망자 자료는 모든 원인에 의한 사망자(all-cause mortality)와 심혈관 질환으로 인한 사망자(cardiovascular disease, 이하 CVD; ICD-10 Codes I00-I99)로 구분하여 분석하였다. 사망자 수에서의 시간적 변화를 고려하기 위해 일 사망자 수를 표준화 하였다. 통계청에서 보고된 관측 사망자(observed deaths)와 기대사망자(baseline or expected deaths, 이하 BDs) 사이의 차를 구함으로써 초과사망자(excess deaths, 이하 EDs)를 산출하였다. 기대사망자의 계산을 위해 사망률의 장기간 변화, 계절적 변화, 요일 변화를 고려하였다(Kysely and Kim, 2009). 또한 서울 등 6개 대도시의 기상관측소에서 1991년부터

**Table 1.** Locations of meteorological stations, population (as of 2005), and mean of daily maximum temperature in summer months (June, July, and August; period: 1991-2005) in 6 major cities (Seoul, Incheon, Daejeon, Daegu, Gwangju, and Busan) in South Korea

Name	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Ht. (m)	Population (as of 2005)	Temperature (°C)
Seoul	37° 34'	126° 57'	85.5	10,167,344	28.6°C
Incheon	37° 29'	126° 37'	54.6	2,600,495	27.8°C
Daejeon	36° 22'	127° 22'	62.6	1,454,638	29.1°C
Daegu	35° 53'	128° 37'	57.3	2,511,306	29.7°C
Gwangju	35° 10'	128° 34'	74.5	1,401,745	29.2°C
Busan	35° 06'	129° 02'	69.2	3,638,293	26.9°C

2005년까지 관측한 일최고기온 자료가 사용되었다. 또한 기온의 증가에 따른 사망률 변화를 추정하기 위하여 선형회귀모형(linear regression model)을 사용하였으며, 95% 신뢰구간(confidence interval)을 산출하였다(http://www.systat.com).

### 3. 도시 별 지리적 특성

Table 1에는 6개 대도시의 인구, 기상관측소의 위치(위도, 경도, 해발고도), 1991년부터 2005년까지 여름철(6, 7, 8월) 일최고기온의 평균값(이하 평균최고기온)을 나타내었다. 2005년 현재 서울의 인구는 약 1,016만 명 정도로서 한반도의 중서부 지역에 위치한 거대도시(megacity)이다. 한강이 도시를 동에서 서로 가로질러 흐르며, 도시의 중심에는 남산, 외곽은 북한산, 관악산, 도봉산, 우면산 등이 경기도와 자연적 경계를 이루고 있다. 서울의 여름철 평균최고기온은 28.6°C이다. 인천은 한반도의 중서부 해안 위치한 도시로서 7~8월에 기온이 가장 높고 강수량이 많다. 인천은 중부 지방에서 볼 수 있는 기후와는 다른 특징을 가지고 있는데, 겨울철 기온은 북서풍의 영향을 받아, 같은 위도 상에 있는 동해안의 도시보다 낮고 강수량 또한 중부 지방에 비해 적은 편이다. 2005년 현재 인천의 인구는 260만 명 정도로서 서울과 부산 다음으로 많다. 인천의 여름철 평균최고기온은 27.8°C로서 서울보다 0.8°C가 낮은 편이다. 대전은 계절이 뚜렷하고 기온이 온화한 중위도 온대 계절풍 기후대에 속한다. 2005년 현재 대전의 인구는 약 145만 명 정도이다. 대전은 차령산맥과 소백산맥의 사이에 끼인 분지로서, 동쪽에는 식장산, 고봉산, 응봉산, 성재산, 계족산이 이어져 있고, 서쪽에는 산장산, 빈계산, 도덕봉, 갑하산, 우산봉으로 이어지는 산줄기가 발달되어 있다. 대전 분지의 남쪽에는 구봉산, 보문산이 연결되어 있으며, 북쪽에

는 수양산, 금병산, 보덕봉, 오봉산으로 이어지는 비교적 낮은 산줄기가 발달되어 있다. 남쪽의 산들이 북쪽의 산들보다 높은 편이다. 대전천, 유등천, 갑천이 합류하여 북쪽의 금강으로 흘러 들어간다. 대전의 여름철 평균최고기온은 29.1°C로서 서울과 비슷한 편이다. 대구는 분지지형으로 이루어져 있는데 북쪽에는 팔공산이, 남쪽에는 비슬산이 있다. 강은 신천이 남에서 북으로 흐르고 금호강과 합쳐지며 금호강은 동에서 서로 흐르다가 낙동강으로 합류된다. 2005년 현재 대구의 인구는 약 251만 명 정도이고, 여름철 평균최고기온은 29.7°C이다. 광주 시의 동부에 무등산이 있고, 도시의 중심에 광주천이 흐르며 구 지역과 광산구와의 사이에 영산강의 지류인 극락강이 흐른다. 2005년 현재 광주시의 인구는 약 140만 명 정도이고, 여름철 평균최고기온은 29.2°C이다. 부산은 한반도의 동남부 해안에 위치한 도시로서 서쪽으로는 한국에서 가장 긴 강인 낙동강이 흐르며, 강서부 북쪽에서 낙동강과 갈라져 흐르는 서낙동강이 있다. 2005년 현재 부산의 인구는 약 364만 명 정도로 서울 다음으로 많고, 여름철 평균최고기온은 26.9°C이다. Table 1에서 부산의 위도가 낮음에도 불구하고 평균기온이 다른 지역에 비하여 낮게 나타나는 것을 볼 때, 우리나라 주요 기상관측 시설 기온관측 환경의 지역대표성에 대한 추가적 연구가 필요함을 시사한다.

### 4. 기온 이노말리와 초과사망

1991년부터 2005년까지 15년간 서울, 인천, 대전, 대구, 광주, 부산 등 한국의 6개 도시에 대하여 기온과 일 사망자 자료를 이용하여 각 도시 별 주민의 폭염에 대한 취약 특성을 비교하였다.

한국은 동아시아 몬순의 영향으로 사계절이 뚜렷하고 각 계절에 따른 기온 차가 큰 특성을 가지고 있다.

**Table 2.** Monthly mean of daily maximum temperature anomaly (MTA, with respect to the base period 1971-2000), monthly sum of excess deaths (EDs) and baseline deaths (BDs), relative excess mortality (REM) and standardized excess mortality (SEM, normalized by 10M population) for all-caused deaths and CVD-caused deaths in 5 months with the largest excess mortality over 1991-2005 for the 6 major cities

## (a) Seoul

Year Month	MTA (°C)	All-caused deaths				CVD-caused deaths			
		EDs	BDs	REM (%)	SEM	EDs	BDs	REM	SEM
1994 07	3.9	669	3016	22.2	622.2	237	777	30.5	220.6
1994 08	2.4	182	3052	6.0	170.0	39	763	5.2	36.9
1996 06	-0.4	153	2939	5.2	147.3	79	688	11.6	76.5
2004 08	0.7	151	3073	4.9	148.8	78	695	11.3	77.4
2000 08	0.5	116	3061	3.8	113.3	9	655	1.4	8.7

## (b) Incheon

Year Month	MTA (°C)	All-caused deaths				CVD-caused deaths			
		EDs	BDs	REM (%)	SEM	EDs	BDs	REM	SEM
1994 07	3.5	143	690	20.8	653.4	69	183	37.8	315.3
1994 08	2.5	69	686	10.1	313.5	0	177	-0.4	-3.2
1992 07	-0.5	41	611	6.9	202.8	18	170	10.9	89.6
1995 06	0.2	42	719	5.9	179.8	13	185	7.3	57.4
2000 08	1.8	49	849	5.8	192.9	16	197	8.1	63.2

## (c) Daejeon

Year Month	MTA (°C)	All-caused deaths				CVD-caused deaths			
		EDs	BDs	REM (%)	SEM	EDs	BDs	REM	SEM
1994 07	4.8	70	399	17.7	574.3	21	85	25.4	176.0
1991 08	-0.7	42	382	11.0	400.2	14	63	23.2	140.1
1999 06	1.0	47	435	10.9	347.6	22	94	23.7	164.3
1994 08	2.6	39	414	9.4	317.2	-1	85	-1.9	-13.0
1995 06	0.1	33	415	8.1	264.8	2	87	3.1	21.3

인체가 폭염에 노출되었을 때 나타나는 반응은 일반적으로 위도에 따른 지역 별 기후특성에 따라 달리 나타나게 된다. 실제로 싱가포르, 태국의 방콕, 필리핀의 마닐라 등 적도 부근에 위치한 도시는 여름철 기온이 항상 높기 때문에 그 지역 주민은 높은 기온 상태에 충분히

히 적응이 되어 기온이 높게 상승하더라도 건강에 특별한 이상을 느끼지 않게 된다(Kim *et al.*, 2009). 그러나, 중위도 및 고위도 지역에 위치한 거주하는 사람들은 기온이 평년의 변동 범위를 벗어나 상승할 경우 더위로 인한 사망자가 발생하는 등 상대적으로 열 스트

## (d) Daegu

Year Month	MTA (°C)	All-caused deaths				CVD-caused deaths			
		EDs	BDs	REM (%)	SEM	EDs	BDs	REM	SEM
1994 07	5.7	120	832	14.4	512.7	61	204	30.3	264.2
1999 06	0.4	66	860	7.8	266.2	-5	191	-3.0	-23.1
1996 07	-0.1	60	886	6.9	245.5	10	191	5.3	40.7
1995 07	0.9	48	867	5.6	196.5	-2	201	-1.0	-8.5
1997 06	2.2	35	850	4.2	143.1	-18	186	-9.8	-73.5

## (e) Gwangju

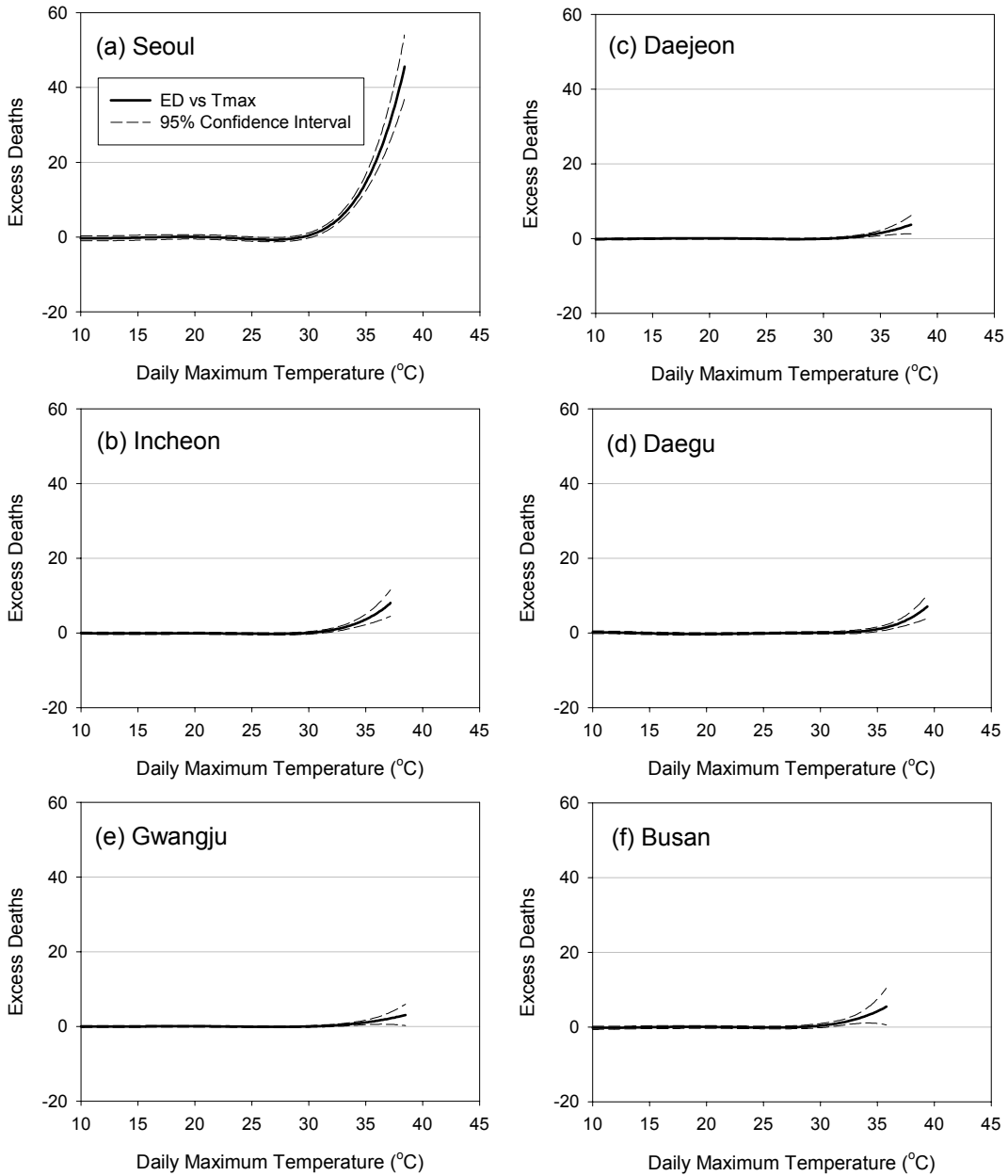
Year Month	MTA (°C)	All-caused deaths				CVD-caused deaths			
		EDs	BDs	REM (%)	SEM	EDs	BDs	REM	SEM
1993 08	-3.4	56	436	12.9	450.9	19	92	20.8	154.6
2001 07	1.1	46	452	10.3	336.0	11	91	12.6	83.1
1998 08	-0.3	36	450	8.1	272.5	8	77	10.5	61.2
1998 06	-1.5	33	431	7.7	246.4	2	79	3.0	17.9
2005 06	1.7	34	450	7.7	247.5	2	90	2.3	15.0

## (f) Busan

Year Month	MTA (°C)	All-caused deaths				CVD-caused deaths			
		EDs	BDs	REM (%)	SEM	EDs	BDs	REM	SEM
1994 07	4.1	115	1321	8.8	301.3	105	409	25.8	275.0
1997 07	0.4	98	1406	7.0	254.7	33	370	9.1	87.2
1991 06	0.9	76	1258	6.1	201	20	362	5.7	54.8
1998 08	-0.2	58	1442	4.1	153.6	0	380	-0.2	-2.4
2004 07	0.2	50	1483	3.4	137.5	16	379	4.3	44.2

레스에 취약하다(Kalkstein, 2003). Table 2는 서울 등 6대 도시에 대하여 1991년부터 2005년까지 15년간의 분석 기간 중 월평균 상대초과사망률(relative excess mortality, 이하 REM)이 5 순위 이내인 경우에 대하여 월평균 기온 아노말리와 사망률 특성을 비교한 결과이다. 월평균 기온 아노말리를 산출하기 위한 평년값은 1971년부터 2000년까지의 자료를 사용하였다. Table 2에서 EDs(excess deaths)는 월 별 초과사망자의 합을 나타내며, BDs(baseline deaths)는 Kysely and Kim

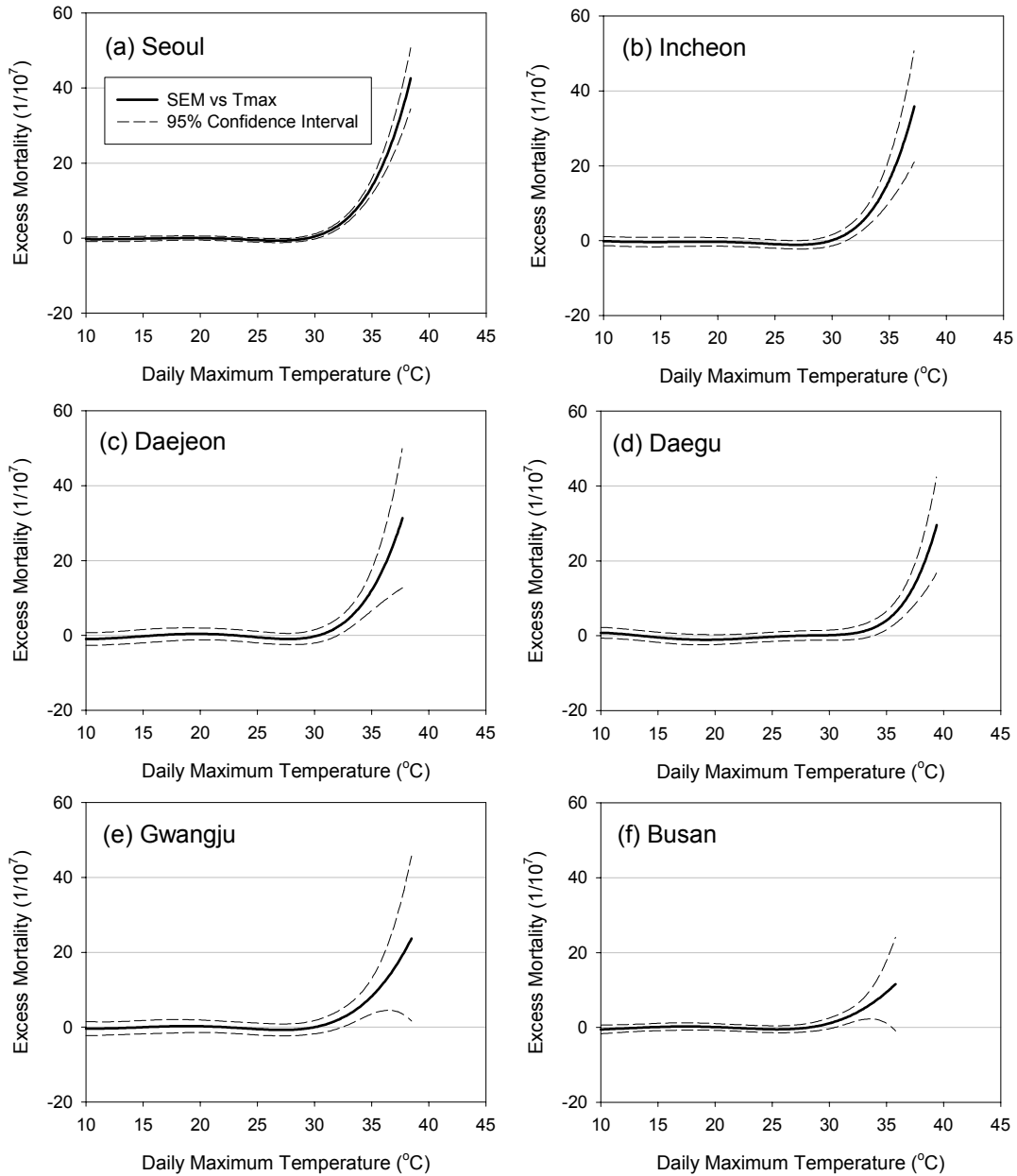
(2009)의 방법에 의해 산출한 월별 기대사망자의 합을 나타낸다. REM은 초과사망자를 기대사망자로 나누어 백분율로 표시한 것이며, SEM(standardized excess mortality)은 지역 간 초과사망률의 절대 비교를 위하여 인구 천만명 당 초과사망률을 나타낸 것이다. 또한 사망자를 모든 원인에 의한 사망자(all-caused deaths, 이하 ACD)와 폭염에 취약한 질병으로 알려져 있는 심혈관 질환(cardiovascular-caused deaths, 이하 CCD)으로 인한 사망자로 구분하여 분석하였다.



**Fig. 1.** Variations of excess deaths as a function of daily maximum temperature in 6 major cities of South Korea, (a) Seoul, (b) Incheon, (c) Daejeon, (d) Daegu, (e) Gwangju, and (f) Busan. Dashed line shows the 95% confidence interval.

서울(Table 2(a))은 1994년 7월이 평년에 비하여 3.9℃ 높은 기온을 보였는데, ACD 분석결과 22.2%의 REM으로 가장 높은 값을 기록하였으며, 월초과 사망자의 합은 669명에 달하였다. 또한 SEM은 622로 나타났다. 한편 CCD의 경우는 REM이 30.5%로서 ACD 보다 8.3% 높게 나타났으며, SEM은 220정도로 나타

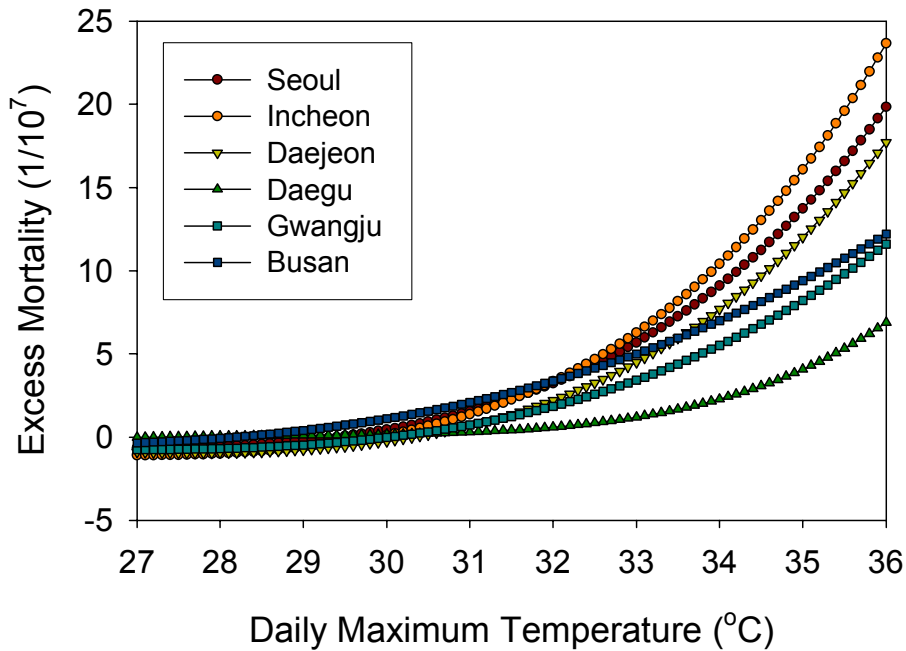
났다. 이는 폭염으로 인한 전체 사망자의 원인 중 약 35%가 심혈관 질환에 의한 것임을 의미한다. 1994년 8월은 두 번째로 높은 REM이 나타난 월로서 ACD의 경우 6.0%로 나타났다. 인천의 경우(Table 2(b))도 1994년 7월과 8월에 많은 초과 사망자가 나타났다. 특히, 1994년 7월 ACD에 의한 SEM은 653.4로서 서울



**Fig. 2.** Variations of standardized excess mortality (per 10 million population) as a function of daily maximum temperature in 6 major cities of South Korea, (a) Seoul, (b) Incheon, (c) Daejeon, (d), Daegu, (e) Gwangju, and (f) Busan. Dashed line shows the 95% confidence interval.

보다 높게 나타났으며, REM은 20.8%로서 서울 다음으로 높게 나타났다. 그리고 1994년 8월은 7월 다음으로 REM이 높은 것으로 나타났다. 1994년 8월의 CCD에서의 REM과 SEM의 음의 값은 7월의 무더위 이후의 추수효과(harvesting effect)에 의한 것으로 해석된

다. 대전(Table 2(c)) 또한 1994년 7월에 ACD에 의한 REM이 17.7%, SEM이 574.3으로 높은 초과 사망률을 기록하였다. 대구(Table 2(d))는 1994년 7월에 ACD에 의한 REM이 14.4%, SEM이 512.7로서 나타났다, CCD로 인한 REM은 30.3%, SEM은 264.2로서



**Fig. 3.** Estimates of excess mortality at high temperatures in 6 major Korean cities. People who live in Incheon appear to be most vulnerable to excess heat, whereas people in Daegu are relatively well adapted to excess heat.

높게 나타났다. 광주의 경우(Table 2(e)) 1993년 8월에 REM이 12.9%로 높게 나타났으나, 다른 도시에 비하여 기온 아노말리와 초과 사망률의 일관성이 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 부산의 경우(Table 2(f)), 1994년 7월에 ACD로 인한 REM이 8.8%, SEM이 301.3으로 높게 나타났다. 1994년 7월 부산에서 나타난 초과사망의 주요원인은 이대근 등(2007)에서 밝혀진 바와 같이 때 이른 무더위의 영향에 기인한 것으로 사료된다.

## 5. 도시 별 기후순응도 비교

서울 등 6개 도시에 대하여 일최고기온의 변화에 따른 초과사망자의 변화를 Fig. 1과 2에 나타내었다. 그림에서 실선은 기온에 따른 사망자의 변화를 가장 잘 설명할 수 있는 선형회귀 분석선을 나타내하고, 파선은 그에 대한 95% 신뢰구간을 의미한다. Fig. 1은 도시별 기온의 증가에 따른 초과사망자 발생에 대한 분석 결과를 나타낸 것이다. 그러나, Fig. 1과 같이 분석할 경우 각 도시 별 폭염으로 인한 초과사망자의 규모를 쉽게 파악할 수 있으나, 도시 간 인구의 규모가 서로 다르기 때문에 도시 간 폭염에 대한 취약성을 비교하기 어려운 점이 있다. 이를 위해 Fig. 2는 각 도시 간의

절대적인 비교를 위하여 표준화된 초과사망률(즉, 인구 천만명당 초과사망률)에 대한 분석결과를 나타내었다.

기온이 증가함에 따라 초과사망이 발생하기 시작하는 임계온도(threshold temperature)는 각 도시별로 각각 다르게 나타났다. 임계온도는 선형회귀식으로부터 기온 0.1°C 변화에 따른 초과사망률의 변화를 계산함으로써 결정하였다. 서울의 경우 임계온도는 29.4°C로 나타났으며, 인천은 29.9°C, 대전은 30.3°C, 대구는 27.3°C, 광주는 30.0°C, 부산은 28.2°C로 나타나 전체적으로는 27~30도의 범위에서 분포하였다. 상대적으로 더운 기후를 가진 것으로 알려진 대구와 부산의 임계온도가 서울과 인천에 비하여 작은 값을 나타낸 것은 의외의 결과이다. 한편, Kim *et al.*(2006)이 일평균 기온을 사용하여 한국의 주요 도시별 임계온도를 비교한 결과에 따르면, 서울, 대구, 대전이 28.1°C, 인천과 광주가 26.6°C로 각각 나타나 도시 별 임계온도가 연구자 간의 방법에 따라 각각 달리 나타날 수 있으며, 일반적으로 예상할 수 있는 각 도시의 위도 별 분포와 반드시 일치하지 않을 수 있음을 알 수 있다.

한편, 기온이 임계온도 이상일 때 각 도시 별로 기온이 1°C 상승함에 따른 인구천만명당 사망률 증가율(즉, SEM 증가율)은 인천 4.8명, 서울 4.7명, 대전 4.3



명, 광주 2.8명, 대구 2.4명, 부산 1.5명의 순으로 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 2의 그림에서 각 도시 별로 기온의 증가에 따른 SEM의 증가율을 나타내는 그림에 잘 나타나 있다. 이는 어느 도시지역 주민의 폭염에 따른 취약 특성을 나타내는 요소로서 임계온도 보다는 임계온도 이상에서 기온 상승에 따른 사망자 증가율이 더 효과적일 수 있음을 밝힌 새로운 과학적 발견이다. Fig. 3은 6개 도시에 대한 기온에 따른 초과 사망률의 변화를 동시에 나타낸 것으로서 위에서 언급한 도시별 기후순응도 특성과 각 도시간의 폭염에 대한 상대적 취약성이 잘 나타나 있음을 알 수 있다. 특히, 일최고기온이 36℃일 때 인구천만명당 초과 사망률은 인천이 23.6명으로 가장 높았고 대구가 6.9명으로 가장 낮았으며, 서울 19.8, 대전 17.7, 부산 12.2, 광주 11.6명의 순으로 나타났다. 이러한 분석결과를 종합해 볼 때, 우리나라의 6대 도시 중 인천과 서울 등 수도권에 거주하는 주민이 폭염에 가장 취약하고 대구와 부산 등 영남권에 거주하는 주민이 폭염에 대한 적응도가 높은 것을 알 수 있다.

## 6. 결론 및 토의

1991년부터 2005년까지 15년 동안 서울, 인천, 대전, 광주, 대구, 부산 등 6개 도시에 대하여 일별 사망자수와 기온 자료를 이용하여 각 도시 별 주민의 기후 순응도를 분석하였으며, 위에서 언급한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 서울은 1994년 7월이 평년에 비하여 3.9℃ 높은 기온을 기록하였는데, 모든 원인에 의한 사망자(ACD)를 분석한 결과, 평소보다 약 22.2%의 사망자 증가가 나타나 부산, 광주, 대구 등 다른 도시 보다 가장 높았다.

둘째, 1994년 7월 서울의 초과사망자 합은 669명에 달하였다. 또한 심혈관 질환이 원인이 되어 사망한 경우에는 상대초과사망률이 30.5%로서 ACD 보다 8.3% 높게 나타났다.

셋째, 임계기온 이상의 기온 범위에서 각 도시 별로 기온이 1℃ 상승함에 따른 인구천만명당 사망률 증가 경향은 인천 4.8명, 서울 4.7명, 대전 4.3명, 광주 2.8명, 대구 2.4명, 부산 1.5명의 순으로 나타났다. 일최고기온이 36℃일 때 인구천만명당 초과 사망률은 인천이 23.6명으로 가장 높았고 대구가 6.9명으로 가장 낮았으며, 서울 19.8명, 대전 17.7명, 부산 12.2명, 광주

11.6명의 순으로 나타났다. 이러한 연구결과는 인천과 서울 등 수도권에 거주하는 주민이 폭염에 가장 취약하고 대구와 부산 등 영남권에 거주하는 주민이 폭염에 대한 적응도가 높다는 것을 시사한다.

넷째, 도시 별 임계온도는 일최고기온을 기준으로 볼 때 27~30℃의 범위에서 분포하였다. 그러나, 임계온도의 분포가 각 도시의 위도별 기후특성을 잘 반영하지는 못하는 것으로 나타났다. 이는 폭염에 따른 지역 간 기후 순응도를 나타내는 지수로서 임계온도 보다 임계온도 이상에서의 사망률 증가율을 비교하는 것이 더 효과적임을 시사하는 결과이다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 부산 등 한국의 남부지역에 위치한 도시에 비해 서울, 인천 등 상대적으로 고위도에 위치한 도시로 갈수록 주민의 폭염에 대한 취약성이 커진다는 사실을 알 수 있다. 따라서, 21세기에 점차 증가할 것으로 예상되고 있는 폭염에 보다 효과적으로 대처하기 위해서는 각 도시 별 폭염 취약성에 대한 연구 결과가 폭염으로 인한 인명구조, 재난 대응 및 저감 정책에 적극적으로 반영될 필요가 있다.

## 사 사

This paper was supported by joint project funded by the KRF (grant no. KRF-2006-GACR-C00005) and the Czech Science Foundation (grant no. 205/07/J044). J. Kim was also partly supported by KMA's R&D program(grant no. NIMR-2009-B-6).

## 참고문헌

- 김지연, 이승호, 2007: 한국의 열파분포와 그 원인에 관한 연구. *대한지리학회지*, **42**, 332-343.
- 김지영, 이대근, 박일수, 최병철, 김정식, 2006: 한반도에서 여름철 폭염이 일 사망률에 미치는 영향. *대기*, **16**, 269-278.
- \_\_\_\_\_, 이대근, 최병철, 박일수, 2007: 클러스터 분석을 통한 종관기단분류 및 서울에서의 일 사망률과의 관련성 연구. *대기*, **17**, 45-53.
- \_\_\_\_\_, 이대근, Jan Kysely, 2008: 한반도와 유럽에서 발생한 폭염의 종관기후학적 특성 비교. *대기*, **18**, 355-365.
- 이대근, 김지영, 최병철, 2007: 1994년 7월 부산지역의 폭염으로 인한 일 사망률 특성 연구. *대기*, **17**, 463-470.
- 박종길, 정우식, 김은별, 2008a: 폭염발생 기준 설정에 관한 연구. *한국환경과학회지*, **17**, 657-669.
- \_\_\_\_\_, 정우식, 김은별, 2008b: 폭염이 일사망자수에 미치는 영향에 관한 연구. *한국대기환경학회지*, **24**, 523-537.

- 최광용, 최종남, 권호장, 2005: 높은 체감온도가 서울의 여름철 질병 사망자 증가에 미치는 영향, 1991-2000. *예방의학회지*, **38**, 283-290.
- 통계청, 2006: 2005년 *한국통계연감* 제 52호, 973pp.
- Baccini, M., A. Biggeri, G. Accetta, T. Kosatsky, K. Katsouyanni, A. Analitis, H. R. Anderson, L. Bisanti, D. D'Ippoliti, J. Danova, B. Forsberg, S. Medina, A. Paldy, D. Rabczenko, C. Schindler, and P. Michelozzi, 2008: Heat effects on mortality in 15 European cities. *Epidemiology*, **19**, 711-719.
- Changnon, S. A., K. E. Kunkel, and B. C. Reinke, 1996: Impact and responses to the 1995 heat wave: A call to action. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1496-1506.
- Chase, T. N., K. Wolter, R. A. Pielke Sr., and I. Rasool, 2006: Was the 2003 European summer heat wave unusual in a global context? *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23709, doi: 10.1029/2006GL027470.
- Cleland, T. S., S. M. Horvath, and M. Phillips, 1969: Acclimatization of women to heat after training. *European Journal of Applied Physiology*, **27**, 15-24.
- Curriero, F. C., K. S. Heiner, J. M. Samet, S. L. Zeger, L. Strug, and J. A. Patz, 2002: Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States. *American J. of Epidemiology*, **155**, 80-87.
- De Freitas, C. R. and E. A. Grigorieva, 2009: The Acclimatization Thermal Strain Index(ATSI): a preliminary study of the methodology applied to climatic conditions of the Russian Far East. *Int. J. Biometeorol.*, **53**, 307-315.
- Ebi, K. L., T. J. Teisberg, L. S. Kalkstein, L. Robinson, and R. F. Weiher, 2004: Heat watch/warning systems save lives: Estimated costs and benefits for Philadelphia 1995-1998. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 1067-1073.
- \_\_\_\_\_, I. Burton, and G. McGregor, 2009: *Biometeorology for adaptation to climate variability and change*. Springer, 284 pp.
- Encyclopedia of Entomology, 2004: *Acclimatization*. Springer, 10.1007/0-306-48380-7\_24.
- Fink, A. H., T. Brucher, A. Kruger, G. C. Leckebusch, J. G. Pinto, and U. Ulbrich, 2004: The 2003 European summer heatwaves and drought- Synoptic diagnosis and impacts. *Weather*, **59**, 209-215.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis-Summary for Policymakers*. R. Alley et al., 18pp (<http://ipcc-wg1.ucar.edu/>).
- Kalkstein, L. S., 2003: Heat and Health: Methodological Considerations for Warning System Development. Public Weather Program Leader's Meeting. Minneapolis, MN, June 24, 2003.
- \_\_\_\_\_, S. C. Sheridan, and Y. C. Au, 2008: A new generation of heat health warning systems for Seoul and other major Korean cities. *기상기술정책*, **1**, 62-68.
- Kim, H., J.-S. Ha, and J. Park, 2006: High temperature, heat index, and mortality in 6 major cities in South Korea. *Archives of Environmental and Occupational Health*, **61**, 265-270.
- Kim, J., H.A. Kim, B.C. Choi, Y. Chun, K.R. Kim, D.G. Lee, J.W. Oh, I.K. Yang, and S.H. Kim, 2007: Health-related weather forecasts in Korea: current status and perspectives. *Global Environ. Res.*, **11**, 13-22.
- \_\_\_\_\_, L.S. Kalkstein, B.-C. Choi, J.-Y. Byon, K.R. Kim, D.-G. Lee, C.-Y. Choi, and S.C. Sheridan, 2008: Development of a heat/health watch warning system for Seoul, South Korea and potential plan for system nationalization. *Proceedings of the 18th International Congress of Biometeorology*, Tokyo, Japan.
- \_\_\_\_\_, and J. Kysely, 2009: Synoptic diagnosis of record-breaking heat waves occurred in summer of 1994 over East Asia. *Proceedings of the 6th Annual General Meeting of Asia Oceania Geosciences Society*, 11-15 August, Singapore
- Kysely, J., and J. Kim, 2009: Mortality during heat waves in South Korea, 1991-2005: how exceptional was the 1994 heat wave? *Climate Res.*, **38**, 105-116.
- \_\_\_\_\_, R. Huth, and J. Kim, 2009: Evaluating heat-related mortality in Korea by objective classification of 'air masses'. *Int. J. Climatology*, in press.
- Li, X., H. Tokura, and T. Midorikawa, 1995: The effects of two different types of clothing on seasonal warm acclimatization. *Int. J. Biometeorol.*, **38**, 111-115.
- Mathew, L., S. S. Purkayastha, A. Jayashankar, and H. S. Nayar, 1981: Physiological characteristics of cold acclimatization in man. *Int. J. Biometeorol.*, **25**, 191-198.
- Meehl, G. A., F. Zwiers, J. Evans, T. Knutson, L. Mearns, and P. Whetton, 2000: Trends in extreme weather and climate events: issues related to modeling extremes in projections of future climate change. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 427-436.
- U.S. Army, 2003: *Heat Acclimatization Guide*. U.S. Army CHPPM, 1-4.
- Wyndham, C. H., N. B. Strydom, J. F. Morrison, F. D. Dutoit, and J. G. Kraan, 1954: A new method of acclimatization to heat. *European J. Appl. Physiol.*, **15**, 373-382.
- \_\_\_\_\_, N. B. Strydom, H. M. Cooke, and J. S. Maritz, 1960: The temperature responses of men after two methods of acclimatization. *European J. Appl. Physiol.*, **18**, 112-122.