

## 기후변화로 인한 고온의 미래 사망부담 추정

양지훈 · 하종식\*†

순천향대학교 환경보건학과, \*한국환경정책·평가연구원

### Estimation of Future Death Burden of High Temperatures from Climate Change

Jihoon Yang and Jongsik Ha\*†

Soonchunhyang University, Sinchang-myeon, Asan-si, Chungcheongnam-do, South Korea

\*Korea Environment Institute, 613-2 Bulgwang-dong Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, South Korea

#### ABSTRACT

**Objectives:** Elevated temperatures during summer months have been reported since the early 20th century to be associated with increased daily mortality. However, future death impacts of high temperatures resulting from climate change could be variously estimated in consideration of the future changes in historical temperature-mortality relationships, mortality, and population. This study examined the future death burden of high temperatures resulting from climate change in Seoul over the period of 2001-2040.

**Methods:** We calculated yearly death burden attributable to high temperatures stemming from climate change in Seoul from 2001-2040. These future death burdens from high temperature were computed by multiplying relative risk, temperature, mortality, and population at any future point. To incorporate adaptation, we assumed future changes in temperature-mortality relationships (i.e. threshold temperatures and slopes), which were estimated as short-term temperature effects using a Poisson regression model.

**Results:** The results show that climate change will lead to a substantial increase in summer high temperature-related death burden in the future, even considering adaptation by the population group. The yearly death burden attributable to elevated temperatures ranged from approximately 0.7 deaths per 100,000 people in 2001-2010 to about 1.5 deaths per 100,000 people in Seoul in 2036-2040.

**Conclusions:** This study suggests that adaptation strategies and communication regarding future health risks stemming from climate change are necessary for the public and for the political leadership of South Korea.

**Key words:** adaptation, climate change, future death burden, high temperature, Seoul

## I. 서 론

20세기 초부터 하절기 기온상승은 사망발생을 높이는 것으로 보고되었다.<sup>1-7)</sup> 이러한 현상은 기후변화로 인한 미래 극한 기상의 발생빈도 및 강도의 증가, 나아가 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 증

가로 이어져 공중보건학적 관심이 되고 있다.<sup>8,9)</sup> 특히 온실가스 시나리오인 대표농도경로(Representative Concentration Pathway; RCP)에 따른 한반도 21세기 말 기후변화 전망을 보면, 과거 30년(1971~2000) 기간 대비 미래 30년(2070~2099)의 기온은 3.4~6.0°C 상승할 것으로 예측된다.<sup>10)</sup>

†Corresponding author: Korea Environment Institute, 613-2 Bulgwang-dong Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, Korea, Tel: +82-2-380-7754, Fax: +82-2-380-7644, E-mail: jsha@kei.re.kr

Received: October 15 2012, Revised: January 2 2013, Accepted: January 7 2013

지금까지 많은 연구들이 하절기 기온상승과 사망 발생 관련성을 평가해왔다. 하지만 추가적으로 기후 변화로 인한 미래 기온상승의 사망발생 영향을 평가 하는 연구들이 수행될 필요가 있다.<sup>11-15)</sup> 이러한 연구 들은 정책결정자들에게 기후변화로 인한 미래의 경 향, 위험 그리고 기회의 다양성 정보를 제공하여 기 후변화로 인한 미래 건강위험에 대한 적응전략을 수립하는데 도움을 줄 수 있기 때문이다.<sup>16)</sup>

기후변화로 인한 미래 하절기 기온상승의 사망발 생 추정은 불확실성과 복잡성에 어려움이 있다. 일 반적으로 기후변화로 인한 건강영향 정도는 크게 3가지 요인인 노출(exposure), 민감도(sensitivity), 그 리고 적응능력(adaptive capacity)의 개별적인 영향 또는 통합적인 영향에 의해 결정된다.<sup>8)</sup> 이러한 관계 는 하절기 기온상승으로 인한 사망발생에도 동일하 게 적용될 수 있다. 하지만 미래 기후변화로 인한 하절기 기온상승의 사망발생은 미래 건강영향의 잠 재적 요인, 예를 들어 인구변화, 사회경제학적인 발 전, 기술의 혁신, 그리고 또 다른 환경적 요인들과 의 상호작용 등으로 달라질 수 있다.<sup>3,17-19)</sup>

지금까지 많은 연구들이 기후변화가 미래 기온상 승 관련한 사망발생에 있어 상당한 기여를 하는 것 으로 보고했다.<sup>20-24)</sup> 하지만 대부분의 연구들은 과거 기온상승으로 인한 사망발생 관련성, 기후, 인구, 그리고 적응에 대한 미래의 변화를 고려하지 못했 다.<sup>25)</sup> 만일 기후변화로 인한 기온상승의 사망발생에 대한 미래 민감한 인구집단 증가를 고려하지 못하면 과소추정(underestimation)의 문제, 적응을 고려하지 못하면 과대추정(overestimation)의 문제를 야기할 수 있다.

기후변화로 인한 미래 하절기 기온상승의 사망발 생 추정연구는 서울을 대상으로 수행된 바 있다. Park 등(2005)은 '1994~2004년의 하절기 기온상승 으로 인한 사망발생 관련성을 바탕으로 2032~2051 년 서울에서 하절기 기온상승으로 인한 사망발생이 매년 300명 이상 초과 발생할 것이다'라고 보고했다.<sup>26)</sup> 하지만 이 연구는 미래 사회가 현재와 동일할 것이 라고 가정하였다. 또한 최근 수행된 Lee 등(2011)의 연구는 1991~2008년의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성을 바탕으로 '미래 인구변화를 고려 한 2041~2050년 서울의 초과사망은 매년 586명이 발생할 것이다'라고 보고했다.<sup>27)</sup> 역시, 이 연구도 미

래 인구의 크기 및 구조를 고려했지만 미래사회의 사망률 수준 및 적응은 고려하지 못했다.

본 연구의 목적은 서울을 대상으로 최근 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 평가와 이를 바 탕으로 인구변화, 사망률 수준 및 적응의 미래 사회 변화 특성을 고려한 기후변화로 인한 하절기 기온상 승으로 인한 사망발생을 추정하는 것이다.

## II. 연구대상 및 방법

### 1. 연구대상 및 범위

본 연구는 서울을 대상으로 하였다. 이전에 수행 한 연구에서 서울은 하절기 기온상승으로 인한 사망 발생이 명확히 나타나는 지역이었다.<sup>28-30)</sup> 본 연구에 서 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 평가 는 1996년부터 2010년까지의 하절기(6~8월)를 대 상으로 하였으며, 기후변화로 인한 하절기 기온상승의 사망발생 추정은 2001년부터 2040년까지의 하절기 를 대상으로 하였다. 분석의 연구대상은 전체연령 집 단으로, 사고사를 제외한 전체원인(International Classification of Disease, 10th Revision(ICD-10), codes A00-U99) 사망을 고려하였다.

### 2. 기상, 사망, 및 인구특성 자료

본 연구에 활용된 자료는 기상자료, 사망자료, 그 리고 인구집단의 특성을 나타내는 인구수 자료와 사 망발생률 자료이다.

기상자료는 기상청(Korea Meteorological Admin- istration)으로부터 획득했다. 본 연구에서 1996년부 터 2010년까지 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 영향평가는 매 3시간마다 측정된 대기 중 기온 및 상대습도 자료를 이용하였다. Barnett 등(2011)은 일 별 기온 노출값으로 일별평균기온, 일별최고기온, 일 별최저기온, 일별평균체감기온(apparent temperature), 그리고 불쾌지수(humidex) 등에 대해 '특정 기온 지 표가 다른 기온 지표보다 더 나은 것은 아니다'라고 보고한 바 있다.<sup>31)</sup> 또한 Kim 등(2006)은 국내 대도 시를 대상으로 수행한 연구에서 '일별사망자수에 대 한 일별평균기온은 일별최고기온보다 더 나은 모형 적합도를 보인다'라고 보고한 바 있다.<sup>28)</sup> 이에 본 연 구는 일별 기온노출 대푯값으로 서울 지상관측지점 에서 측정된 매 3시간 측정 자료를 평균화한 당일

일별평균기온을 사용했다.

2011년부터 2040년까지 하절기 기온상승으로 인한 사망부담 추정에 활용한 서울의 일별평균기온은 국립기상연구소에서 온실가스 시나리오 RCP 2중(4.5 및 8.5)에 대해 미래 전 지구 기후가 어떻게 변화될 것인지에 대해 전망한 값으로 이용했다. 온실가스 시나리오 RCP4.5 및 RCP8.5는 2007년 기후변화에 대한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) 4차 기후변화 평가보고서 발간 이후, 2013~2014년 발간 예정인 IPCC 제5차 기후변화 평가보고서를 위해 국제사회에서 표준 온실가스 시나리오로 선정한 것이다.<sup>10)</sup> 이러한 RCP4.5 및 RCP8.5의 온실가스 시나리오는 전지구 기후변화 모델에 적용되어 전지구 기후변화 시나리오(135 km 격자 해상도)로 산출되며, 나아가 지역기후모델을 이용한 역학적 상세화로 한반도 기후변화 시나리오(12.5 km 격자 해상도), 나아가 한반도 기후변화 시나리오에 통계적 상세화 기법을 적용하여 남한 상세 기후변화 시나리오(1 km 격자 해상도)로 산출된다.<sup>32)</sup> 본 연구는 남한 상세 기후변화 시나리오의 1 km 관측격자 자료를 이용하여 서울의 행정구역에 속한 격자값들을 평균한 일별평균기온 값을 활용하였다.

서울 일별사망자수에 대한 자료는 통계청(Korean National Statistical Office; KNSO)의 사망원인통계로부터 가공했다. 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 평가와 관련하여 1996년부터 2010년까지 모든 사망자에 대한 자료에서 사망 당시 서울에 거주하지 않은 사망자 및 사망원인이 사고사(ICD-10 codes V00-Y99)인 경우는 제외하여 일별사망자수를 산출했다. 본 연구에서는 전체 연령 대상의 일별사망자수에 대한 분석을 수행했다.

본 연구는 하절기 기온상승으로 인한 사망부담 추정과 관련하여 인구수 자료와 사망발생률 자료를 이용했다. 인구수 자료는 KNSO에서 제공하는 2001년부터 2040년까지 서울의 연도별 장래인구추계 통계로서 2010년까지는 확정된 인구수이며 2011년부터 2040년까지는 출생, 사망, 순이동을 고려한 2012년 6월 기준의 추계된 인구수이다. 사망발생률 자료는 KNSO에서 제공하는 2001년부터 2010년까지 인구동향조사의 서울 연도별 사망률과 2011년부터 2040년까지 장래인구추계에 활용되는 장래인구변동요인(2012년 6월 기준)의 사망률이다. 여기에서 KNSO

에서 제공하는 2011년부터 2040년의 서울 연도별 사망발생률은 본 연구에서 활용하기 위한 하절기 동안의 사망발생률로 가공되었다. 2011년부터 2040년까지 연간 하절기(6월~8월) 사망발생률은 2011년부터 2040년까지 연간 사망발생률에 2001년부터 2010년까지의 인구동향조사에서 확인된 서울의 연간 대비 하절기 사망자수 비율을 적용하여 산출하였다.

### 3. 통계적 분석 방법

일반적으로 하절기 기온상승의 사망발생 추정은 하절기의 기온상승으로 인한 사망발생 관련성에 해당 인구집단의 하절기 기온상승에 대한 노출 수준 및 사망발생률을 적용함으로써 계산된다.<sup>33-35)</sup> 따라서 본 연구에서의 미래 기후변화로 인한 하절기 기온상승의 사망발생 추정은 미래 기후변화로 인한 하절기 기온상승 정도, 현재의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 및 미래 변화 정도, 그리고 미래 인구집단의 사망률 및 인구수 변화를 고려하여 계산하였다.

이에 본 연구는 크게 두 단계의 평가로 수행되었다. 첫째 과거(1996~2010년) 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성을 평가했으며, 둘째 과거 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 정도를 활용하여 과거(1996~2010년) 및 미래(2011~2040년)의 연간 하절기 기온상승으로 인한 사망발생을 평가했다.

첫 번째 단계로서, 1996년부터 2010년까지의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성은 비선형 포아송 회귀모형(Nonlinear Poisson regression model)을 사용했다.<sup>28,36)</sup> 비선형에 대한 평활함수는 자연 3차 스플라인(Natural Cubic Spline; NCS)을 활용했다. 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 평가는 전체기간(1996~2010년) 및 5년씩 구분한 기간들(1996~2000년, 2001~2005년, 2006~2010년)에 대해 수행했다. 다음은 본 연구의 기온-사망 관련성을 평가하기 위한 비선형 포아송 회귀모형이다.

$$\log[E(Y)] = \beta_0 + \alpha_1(\text{day-of-week}) + \gamma_1(\text{calendar-year}) + \text{NCS}(\text{summer-day, df=3}) + \text{NCS}(\text{Humidity, df=3}) + \beta_1(\text{Temperature}) + \beta_2(\text{Temperature-threshold}).$$

여기에서 E(Y)는 기대되는 일별사망자수를 의미한다. 위의 모형은 하절기 동안의 일별사망자수 변화를 보정하기 위해 하절기 동안의 날짜(즉 1에서 91

까지의 숫자)를 자유도(degree of freedom) 3으로 평활하며, 일별사망자수의 장기적 경향을 보정하기 위해 연도값을 지시변수(indicator variable)로 활용한다. 또한 요일 및 휴일 효과를 보정하기 위해 지시변수를 사용한다. 마지막으로 일별평균상대습도에 대한 보정은 자유도 3으로 평활한다.

일반적으로 일별 기온상승으로 인한 일별 사망자수 관련성은 U자 또는 J자 형태를 가지는데, 일별 기온상승으로 인해 일별 사망자수가 급격히 증가하는 온도를 임계온도(threshold temperature)고 한다. 그래서 모형 적합할 때에 임계온도 이상에서의 일별 평균기온 상승으로 인한 사망 관련성은 임계온도를 기준으로 일별평균기온을 2개 범위로 나누어 평가되었다. 즉 모형에서 Temperature는 일별평균기온을 의미하는데, (Temperature-threshold)는 일별평균기온이 임계온도 이하에서는 0의 값, 초과 시에는 (Temperature-threshold)의 값을 갖도록 했다. 이러한 모형은 전체 일별평균기온 범위에 대한 효과를 임계온도를 전후하여 추정하는데, B형 스플라인 선형회귀모형(B-mode splined linear regression model)으로 알려져 있다.<sup>37,38)</sup> 최종적으로 임계온도 이상에서의 일별평균기온 1°C 상승으로 인한 일별사망자수 변화는 상대위험비(Relative Risk; 이하 RR)인  $\exp(\beta_1 + \beta_2)$ 으로 도출된다.

본 연구에서 기온상승으로 인한 사망영향의 임계온도는 분석기간별 해당 자료의 하절기 일별평균기온에 대한 80% 수준으로 설정했다. 이는 분석 대상별 하절기 기온상승으로 인한 일별평균기온 노출횟수를 동일화하기 위한 것인데, 과거 일본의 47개 현(prefecture)을 대상으로 수행한 기온상승으로 인한 사망영향 연구에서 기온의 임계온도는 분석기간 자료의 하절기 일별평균기온에 대한 80~85% 수준에서 결정된다는 결과를 바탕으로 설정했다.<sup>39)</sup> 더불어 본 연구에서는 임계온도 설정의 임의성 또는 주관성에 대한 보완으로서 임계온도를 하절기 일별평균기온의 85%, 75% 수준으로 설정하여 추가적인 분석을 수행했다.

두 번째 단계로서, 1996년부터 2010년까지 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 평가결과를 활용한 2001년부터 2040년까지 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 평가는 기여부담(attributable burden)을 활용했다. 본 연구에서 기여부담은 연간 인구수

대비 임계온도 이상의 기온노출로 인한 연간 하절기 기여사망자수 정도로서 정의했는데, 연간 하절기 기여사망자수를 나타내는 N의 추정은 과거연구들에서 기여사망자수를 추정하는 방식<sup>33-35)</sup>을 활용하여 아래와 같이 수정, 적용했다.

$$N = \text{Incidence} \times \text{Population} \times (RR_1 - 1) / RR_1$$

여기에서 Incidence는 연간 하절기 사망발생률, Population은 연중 인구수, 그리고  $(RR_1 - 1) / RR_1$ 은 연도별 해당 지역의 전체 인구집단이 노출되는 것을 가정한 하절기 기온상승으로 인한 사망발생의 기여분율(attributable fraction)을 의미한다.  $RR_1$ 은  $\exp[(\beta_1 + \beta_2) \times \text{Excess\_Temp}]$ 로 정의되는데, Excess\_Temp는 하절기 동안의 임계온도 이상인 날들에 대해 (Temperature-Threshold)를 계산, 하절기 92일(6~8월)로 평균화한 값을 의미한다. 기여부담은 산출된 연간 하절기 기여사망자수를 전체 인구수로 나누어 줌으로서 산출했다.

최종적으로 이 연구의 미래 기후변화로 인한 하절기 기온상승의 사망발생 추정은 두 번째 단계의 미래 기후변화로 인한 하절기 기온상승의 사망부담을 추정함에 있어서 미래 기후변화로 인한 하절기 기온상승 정도(즉, RCP4.5 및 RCP8.5에 따른 기온상승 정도), 현재 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 및 미래 변화(즉, 임계온도 수준 및 임계온도 이상에서의 관련성 변화), 그리고 미래 인구집단의 인구수 및 사망발생률 변화를 고려한 다양한 시나리오를 바탕으로 하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 기술적 결과

Table 1은 서울의 2001년부터 2010년까지 연중 인구수, 하절기 사망발생률, 하절기 일별사망자수, 그리고 하절기 일별평균기온의 평균 및 백분위수를 보여준다. 서울의 연중 인구수는 약 1,000만명, 하절기 일별평균기온은 23~25°C 수준이며 해당 분석기간 동안 연도별 변화를 보이지는 않았다. 하지만 하절기 일별사망자수는 1996년 84.33명이나 2010년에는 91.58명으로서 시계열적인 증가경향을 보였으며, KNSO에서 받은 2001년부터 2010년까지 사망발생률 역시 시계열적인 증가경향을 보였다.

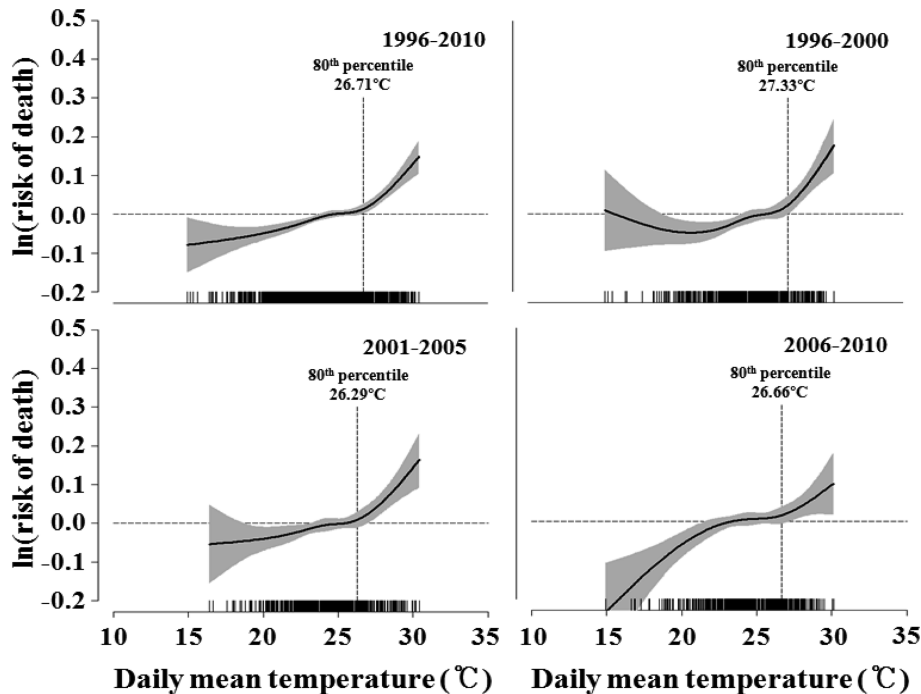
**Table 1.** Characteristic of population, incidence of death, daily death counts, and daily mean temperature in summer (June-August) in Seoul, 1996-2010

Year	Population (N)	Incidence* (per 100,000)	Daily death Count† (N (SD))	Daily mean temperature (°C)			
				Mean (SD)	Percentile‡		
					75th	80th	85th
1996	10,195,359	-	84.33 (10.07)	24.23 (2.78)	26.94	27.59	27.75
1997	10,115,549	-	84.99 (10.25)	25.46 (2.91)	27.56	27.85	28.36
1998	10,051,237	-	84.61 (9.63)	23.95 (2.63)	25.59	25.81	26.09
1999	10,035,810	-	84.75 (9.89)	24.99 (2.62)	26.56	27.15	28.64
2000	10,078,434	-	87.59 (10.46)	25.57 (2.29)	27.53	27.99	28.29
2001	10,087,035	88.45	88.51 (9.23)	24.98 (2.38)	26.61	26.74	27.38
2002	10,041,502	90.11	87.34 (9.97)	23.91 (2.45)	25.56	25.85	25.98
2003	10,029,787	88.62	84.28 (9.18)	23.18 (2.17)	24.75	25.03	25.24
2004	10,036,241	89.20	86.84 (11.43)	24.73 (2.70)	26.59	27.56	28.34
2005	10,011,324	90.37	85.55 (10.84)	24.38 (2.61)	26.16	26.49	27.09
2006	10,035,377	89.75	88.79 (9.86)	24.01 (3.00)	26.51	27.06	27.64
2007	10,042,096	90.90	87.09 (8.33)	24.61 (2.40)	26.42	26.70	27.15
2008	10,081,017	89.99	86.22 (9.98)	24.01 (2.89)	25.79	26.31	27.03
2009	10,103,872	91.06	86.28 (10.46)	24.16 (2.37)	25.77	26.13	26.54
2010	10,050,508	94.49	91.58 (10.74)	25.24 (2.18)	26.69	27.03	27.33

\*Incidence is defined as death counts from all non-accidental causes per 100,000 in summer.

†Daily count of all non-accidental deaths in summer.

‡Percentile with daily mean temperature in summer season (June-August).



**Fig. 1.** Exposure-response curve for daily mean temperature and daily death counts for all ages, according to definition of study period in summer (June-August), 1996-2010.

**Table 2.** Characteristic of population, incidence of death, and daily mean temperature in summer (June-August) in Seoul, 2011-2040

Year	Population (N)	Incidence of death* (per 100,000)	Predicted daily mean temperature from RCP4.5 (°C)			Predicted daily mean temperature from RCP8.5 (°C)				
			Mean (SD)	Percentile <sup>†</sup>			Mean (SD)	Percentile <sup>†</sup>		
				75th	80th	85th		75th	80th	85th
2011	10,026,451	100.6	24.8(2.5)	26.6	27.1	27.3	24.7(3.3)	27.2	27.9	28.3
2012	9,975,881	100.6	25.0(2.0)	26.4	26.6	26.9	26.5(2.2)	28.0	28.7	29.0
2013	9,991,064	103.0	26.4(2.4)	28.0	28.8	29.6	25.7(3.7)	28.6	29.5	30.5
2014	10,007,651	107.8	25.0(2.8)	26.7	27.4	27.8	24.3(2.6)	25.7	26.2	26.6
2015	10,025,756	110.2	24.7(3.3)	27.0	27.9	28.7	24.8(2.8)	26.8	27.1	27.6
2016	10,045,964	115.0	24.1(2.2)	25.5	25.6	26.0	24.5(2.4)	25.8	26.1	26.7
2017	10,067,865	117.4	25.3(2.5)	27.2	27.9	28.1	26.2(2.4)	27.9	28.3	29.2
2018	10,090,341	122.2	25.2(2.2)	26.8	27.1	27.3	23.9(2.3)	25.8	26.1	26.4
2019	10,112,903	124.6	25.9(3.7)	28.2	29.6	30.3	24.1(2.4)	25.9	26.4	26.6
2020	10,135,026	129.4	25.7(2.9)	27.3	28.5	28.8	24.9(2.7)	26.8	27.5	28.1
2021	10,155,783	131.8	26.3(2.7)	28.9	29.4	30.1	26.0(3.3)	27.9	28.7	29.6
2022	10,174,608	136.6	24.2(2.6)	26.0	26.3	26.8	25.5(2.7)	27.3	27.8	28.2
2023	10,190,727	139.0	24.4(2.7)	26.5	27.1	27.5	26.0(2.6)	27.8	28.8	29.3
2024	10,204,290	143.8	24.6(2.2)	26.0	26.7	26.9	26.3(2.5)	27.9	28.5	29.0
2025	10,214,422	146.1	23.8(2.0)	25.3	25.6	25.9	25.7(2.4)	27.3	27.6	28.0
2026	10,220,273	150.9	25.7(2.4)	26.7	27.1	28.6	27.7(2.9)	29.8	30.4	30.9
2027	10,221,681	153.3	26.0(2.2)	27.7	28.2	28.4	25.4(1.9)	26.6	26.7	27.2
2028	10,218,901	158.1	26.0(2.5)	27.5	27.9	28.8	27.4(2.5)	29.5	30.0	30.4
2029	10,212,440	162.9	26.9(2.9)	28.8	30.1	30.7	26.2(2.6)	28.1	28.2	28.6
2030	10,202,243	167.7	25.9(2.4)	27.2	27.5	28.3	26.7(2.3)	28.2	28.5	28.8
2031	10,188,328	170.1	26.1(2.2)	27.8	28.0	28.2	26.5(2.4)	28.3	28.5	29.2
2032	10,171,764	174.9	25.0(2.6)	26.3	26.9	28.4	27.0(2.0)	28.4	28.6	28.9
2033	10,151,328	179.7	25.5(2.1)	26.9	27.3	27.6	25.8(2.6)	27.5	28.0	28.7
2034	10,128,003	184.5	26.1(1.9)	27.2	27.6	27.9	27.7(2.6)	29.2	29.5	30.1
2035	10,101,828	189.3	25.4(2.7)	27.6	27.9	28.2	26.0(2.2)	27.5	28.0	28.3
2036	10,072,478	196.5	24.7(2.8)	26.5	27.1	27.6	26.2(2.6)	28.2	28.6	29.1
2037	10,039,852	203.6	25.9(2.6)	27.7	28.1	28.4	26.6(2.4)	28.1	28.5	29.1
2038	10,003,809	206.0	25.4(2.5)	27.1	27.4	27.8	25.4(2.1)	26.6	26.8	27.4
2039	9,965,542	213.2	24.6(2.6)	26.3	26.8	27.1	25.3(3.0)	27.6	27.8	28.1
2040	9,924,373	220.4	25.3(2.1)	26.8	27.0	27.2	25.7(2.2)	27.3	27.5	28.0

\*Incidence is defined as all cause of death in summer season.

<sup>†</sup>Percentile with daily mean temperature for summer season (June-August).

Fig. 1은 서울의 1996년부터 2010년까지 하절기 동안 비선형 포아송회귀모형을 적용한 일별평균기온 상승으로 인한 일별사망자수의 노출-반응 곡선이다. 각각의 노출-반응 곡선은 전체기간(1996~2010년) 및 5년씩 구분한 기간들(1996~2000년, 2001~2005년, 2006~2010년)에 대한 결과이다. 4개의 노출-반응 곡선 모두에서 특정 임계온도 이상에서부터 사망발생

위험이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 이러한 경향은 1996~2000년의 곡선보다는 2001~2005년의 곡선에서 그리고 이보다는 2006~2010년의 곡선에서 기온기가 감소하는 것으로 나타났다.

Table 2는 서울의 2011년부터 2040년까지 연중 인구수, 하절기 사망발생률, 그리고 온실가스 시나리오 RCP 2종에 따른 하절기 일별평균기온의 평균 및 백

분위수를 보여준다. 서울 전체 인구수는 2027년까지 증가하다가 다시 감소하는 것으로 전망되었다. 하지만 하절기 사망발생률의 경우는 2011년에 10만 명당 100.6명이나 2040년에는 10만 명당 220.4명으로 두 배 이상 증가하는 것으로 전망되었다. 온실가스 시나리오 RCP4.5와 RCP8.5에 의한 서울 기온전망은 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 하절기 일별평균기온의 연도별 평균은 시계열적인 증가경향을 보였다.

**2. 사망에 대한 기온상승의 정량적 효과와 부담**

Table 3은 서울의 분석기간별 임계온도와 임계온도 이상에서의 기온 1°C 상승에 따른 일별사망자수 발생의 RR을 추정한 결과이다.

하절기 일별평균기온 상승으로 인한 사망발생 관련성과 관련하여, 임계온도 수준을 분석기간 자료의 80% 수준으로 설정했을 때에 서울의 임계온도는 전체기간, 1996~2000년, 2001~2005년, 그리고 2006~2010년 순으로 각각 26.71°C, 27.33°C, 26.29°C, 그리고 26.66°C 으로 확인되었다(Table 3). 이러한 임계온도 이상에서의 일별평균기온 1°C 상승으로 인한 전체 연령의 일별사망자수 발생의 RR은 전체기간, 1996~2000년, 2001~2005년, 그리고 2006~2010년 순으로 각각 1.029(95% Confidence Interval: 1.018~1.040), 1.051(95% CI: 1.028~1.074), 1.030(95% CI: 1.015~1.047), 그리고 1.015(95% CI: 0.994~1.036)로 추정되었다(Table 3).

서울에서 동일한 횡수(즉, 해당 분석기간 동안 하

절기 일별평균기온의 80% 수준 임계온도 설정)의 일별평균기온 노출에 대해 일별사망자수에 대한 관련성은 1996~2000년에 가장 높게 나타나고, 2006~2010년에 가장 낮게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 경향은 임계온도 수준을 분석기간 하절기 일별평균기온의 75% 또는 85% 수준으로 설정했을 때에도 일관성 있게 나타났다(Table 3).

Table 4는 전체연령의 전체원인 사망에 대한 서울 2001년부터 2010년까지의 측정된 하절기 일별평균기온 및 2011년부터 2040년까지의 추정된 하절기 일별평균기온 (RCP4.5 및 RCP8.5) 노출로 인한 연간 기여사망을 Table 3의 임계온도 및 분석기간의 기온기별로 추정하고 매 5년씩 평균화하여 산출한 것이며, 연간 기여사망을 매 5년씩의 평균화된 인구수로 나누어 연간 기여부담을 산출한 것이다. 임계온도를 매년 하절기 일별평균기온의 80% 수준으로 정의하고 임계온도 이상에서의 관련성인 RR을 1996년부터 2010년까지의 추정 결과인 1.029로 정의했을 때, 연간 기여사망은 2001년에서 2010년에 연간 50여명, 2036~2040년에 연간 150여명으로 추정되었다. 온실가스 시나리오 RCP4.5에 의한 일별평균기온 노출이 RCP8.5에 의한 일별평균기온 노출보다 다소 높은 연간 기여사망을 보였다. 임계온도를 1996년부터 2010년까지의 하절기 일별평균기온의 80% 수준인 26.71°C로 정의하고 임계온도 이상에서의 관련성인 RR을 1996년부터 2010년까지의 추정 결과인 1.029로 정의했을 때에 연간 기여사망은 2001년

**Table 3.** Estimated relative risk in mortality (95% confidence interval) associated with a 1°C increase in temperature above the thresholds in Seoul, South Korea, according to definitions of threshold (75<sup>th</sup>, 80<sup>th</sup>, and 85<sup>th</sup> percentile of daily mean temperature in summer season)

Study period	75 <sup>th</sup> percentile* of threshold		80 <sup>th</sup> percentile* of threshold		85 <sup>th</sup> percentile* of threshold	
	Threshold (°C)	RR <sup>‡</sup> (95% CI)	Threshold (°C)	RR <sup>‡</sup> (95% CI)	Threshold (°C)	RR <sup>‡</sup> (95% CI)
'96-'10	26.31	1.026 (1.017~1.035)	26.71	1.029 (1.018~1.040)	27.29	1.037 (1.023~1.051)
'96-'00	26.83	1.042 (1.024~1.060)	27.33	1.051 (1.028~1.074)	27.81	1.064 (1.034~1.095)
'01-'05	25.91	1.028 (1.014~1.042)	26.29	1.030 (1.015~1.047)	26.70	1.035 (1.016~1.053)
'06-'10	26.31	1.015 (0.997~1.033)	26.66	1.015 (0.994~1.036)	27.14	1.018 (0.992~1.045)

\*Percentile of daily mean temperatures in summer season (June-August).

†The temperature at which the risk of mortality begins to increase with increasing temperature.

‡Relative Risk.

**Table 4.** Yearly attributable death from high temperature in summer (June-August) in Seoul, from 2001 to 2040, according to definitions of threshold and slope

Group	Year	Yearly attributable death (N (95% CI))		
		Fluctuated threshold (80 <sup>th</sup> )* and slope (RR = 1.029) from 1996-2010	Fixed threshold (26.71°C) and slope (RR = 1.029) from 1996-2010	Fluctuated threshold (80 <sup>th</sup> )* and slope (RR = 1.051) from 1996-2000
Measured temperature	2001-2005	62(39~85)	56(35~76)	109(61~156)
	2006-2010	57(36~77)	55(35~74)	99(56~143)
Predicted temperature from RCP4.5	2011-2015	67(43~92)	131(83~179)	118(66~170)
	2016-2020	95(60~130)	192(122~261)	166(93~239)
	2021-2025	91(58~125)	138(87~188)	160(89~230)
	2026-2030	154(97~210)	340(216~463)	269(151~387)
	2031-2035	126(80~172)	249(158~339)	221(124~318)
	2036-2040	153(97~209)	244(154~332)	268(150~386)
Predicted temperature from RCP8.5	2011-2015	94(60~129)	191(121~260)	165(92~237)
	2016-2020	91(58~124)	117(74~159)	160(89~229)
	2021-2025	116(74~159)	294(187~401)	204(114~293)
	2026-2030	113(71~154)	455(289~619)	198(111~285)
	2031-2035	138(87~189)	469(298~639)	242(135~348)
	2036-2040	142(90~194)	354(224~482)	250(140~359)

\*Fluctuated threshold was defined as 80<sup>th</sup> percentile with daily mean temperature for each summer (June-August) in study period.

에서 2010년에 연간 55여명, 2036~2040년에 RCP4.5 연간 244명, RCP8.5 연간 354명으로 추정되었다. 마지막으로 임계온도를 1996년부터 2010년까지 하절기 일별평균기온의 80% 수준으로 정의하나, 임계온도 이상에서의 관련성인 RR을 1996년부터 2000년까지의 추정 결과인 1.051로 정의했을 때에 연간 기여사망은 2001년에서 2010년에 연간 100여명, 2036~2040년에 RCP4.5 연간 268명, RCP8.5 연간 250명으로 추정되었다.

#### IV. 고 찰

본 연구는 기후변화로 인한 하절기 기온상승의 사망영향 평가로서 과거부터 현재까지의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 및 기후변화로 인한 미래 하절기 기온상승의 기여사망을 평가하였다. 과거부터 현재까지의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 평가는 기온상승으로 인해 사망영향이 나타나기 시작하는 임계온도를 분석기간별(전체기간, 1996~2000년, 2001~2005년, 2006~2010년) 해당 자료의 하절기 일별평균기온에 대한 85%, 80%,

75% 수준으로 각각 설정하여 평가했다. 이러한 과거 기간 동안의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 평가결과들(임계온도 및 임계온도이상에서의 관련성 정도)은 기후변화로 인한 미래 하절기 기온상승의 기여사망을 추정하는데 사용되어졌다.

본 연구의 1996년부터 2010년까지 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 분석결과는 이전에 수행한 하절기 기온상승이 사망에 있어 유의미한 주요 요인이라는 결과와 일관성을 보였다.<sup>28-30</sup> 서울의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성은 지난 1996년부터 2010년까지 감소하는 경향을 보였다. 또한 이러한 결과는 임계온도를 다양하게 설정했을 때에도 일관되게 나타났다(Table 3). 과거 많은 연구에서 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성의 상대적인 감소는 열적 스트레스로 인한 잠재적 위험요인과 관련된 의료서비스 향상, 에어컨 보급, 그리고 공중보건 프로그램 제공 등 적응으로 인해 설명될 수 있음을 제안하였다.<sup>20,33,35,39-41</sup> 특히 에어컨 보급은 하절기 기온상승으로 인한 사망 및 상병 발생의 가장 큰 경감요인으로 제안되었다.<sup>42-49</sup> 서울의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 감소는 다양한



요인에 의해서 영향을 받을 것으로 예상할 수 있으나, 최근 Ha and Kim(2012)의 연구는 가정의 에어컨 보급률 증가 및 국내 총생산액의 전체 의료지출액 비중 증가와 관련될 수 있음을 보고했다.<sup>49)</sup>

본 연구의 장점은 기후변화로 인한 미래 하절기 기온상승으로 인한 기여사망을 추정할 때, 미래 인구학적 특성 변화(즉, 인구수 및 사망률 수준 변화)를 고려함과 동시에 과거에서부터 현재까지의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 관련성 정도를 다양하게 적용함으로써 적응(adaptation)을 고려했다는 것이다. 그 결과 과거 국내 대도시를 대상으로 수행된 기후변화로 인한 미래 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 추정은 과대 추정되었을 가능성을 시사한다(Table 4).

기후변화로 인한 미래 하절기 기온상승의 기여사망 추정은 하절기 기온상승에 대한 인구집단의 미래 민감도(sensitivity)에 영향을 받을 수 있다. 이는 미래 인구학적 변화로부터 나타날 수 있는데, 노령인구의 증가는 위협에 처하게 될 인구의 비중을 높일 수 있다.<sup>9,50,51)</sup> 예를 들어 노인의 경우에 혼자 지내는 시간이 늘어나 사회적인 고립과 함께 부실한 건강수준에 처할 가능성이 더 높을 수 있다.<sup>52)</sup> 지금까지 연구들은 인구의 크기 및 구조가 현재 상태와 동일하게 유지될 것이라고 가정했다.<sup>25)</sup> 본 연구는 전체 연령집단에 대한 분석으로서 미래 인구학적 특성으로서 인구 크기 및 인구집단의 노령화로 인한 사망률 변화를 고려하였다.

기후변화의 미래 기온상승으로 인한 하절기 사망발생 추정에 고려되어야 할 또 하나의 사항은 시간적인 변화에 따른 인구집단의 적응이다.<sup>53)</sup> 일반적으로 적응은 인구집단이 그들의 변화에 대응한 하나의 신체적인 변화 과정일 수 있다.<sup>54)</sup> 또한 사람들은 에어컨 사용의 증가, 행동패턴의 변화, 그리고 주거 공간 및 도시 계획 등의 발달로 인해 기온상승에 적응할 수 있다.<sup>55-57)</sup> 인구집단의 인구학적 특성이 변하지 않을 것이라는 가정과 함께 지금까지 많은 연구들은 미래 기온상승 관련한 사망발생 추정에서 기온상승으로 인한 사망발생 관련성이 미래에도 여전히 변하지 않을 것이라고 가정했다.<sup>25)</sup>

기후변화로 인한 미래 하절기 기온상승의 사망발생 추정과 관련하여 Huang 등(2011)의 연구는 적응을 고려할 수 있는 방법으로 유사한 특성을 가진 도시들의 기온-사망 관련성을 사용하는 방법, 동일한

도시에서 유사한 특성을 가진 하절기의 기온-사망 관련성을 사용하는 방법, 그리고 현재의 기온-사망 관련성이 완화된 것으로 적용하는 방법으로서 적응을 고려할 수 있다고 제안하였다.<sup>25)</sup> 특히 현재 기온-사망 관련성이 미래에 완화되는 것으로서의 적응과 관련하여 Dessai(2003)의 보고서는 임계온도 1°C 상승은 매 30년마다 나타날 수 있음을 가정했으며,<sup>58)</sup> Gosling 등(2009)의 보고서는 적응 정도와 관련하여 아무런 적응이 없는 경우, 임계온도 2°C 상승의 경우, 그리고 임계온도 4°C 상승의 경우를 가정했다.<sup>59)</sup> 하지만 두 보고서 모두 임계온도 이상에서 기온상승으로 인한 사망발생 관련성(또는 기온기)은 변화가 없는 것으로 가정했다.

Fig. 2는 하절기 기온상승으로 인한 사망발생에서 임계온도 및 임계온도 이상에서 관련성(또는 기온기) 변화에 따른 적응 개념을 도식화한 것이다. 본 연구에서 적응은 미래 기온상승으로 인한 사망발생에 있어 임계온도의 상승(해당 연도의 하절기 일별평균기온 80% 수준으로 유지)과 임계온도 이상에서 기온상승으로 인한 사망발생 관련성(또는 기온기) 변화(임계온도 이상에서의 기온사망 기온기를 1996~2000년 및 1996~2010년 분석기간 결과별 활용)를 동시에 고려함으로써 적용했다. Hajat and Kosatky(2010)의 보고서는 하절기 기온상승으로 인한 사망발생 임계온도는 해당 지역 기후에 대한 인구집단의 내성(tolerance)을 나타내는 척도일 수 있으며, 임계온도 이상에서 기온상승으로 인한 사망발생 관련성(또는 기온기) 감소는 의료서비스 및 주거와 같은 사회적 변형을 반영하는 것으로 제시했다.<sup>60)</sup> 또한 Davis 등(2003)의 보고서는 임계온도가 인구집단의 날씨에 대한 민감도(sensitivity) 정도를 나타내는 것으로 제시

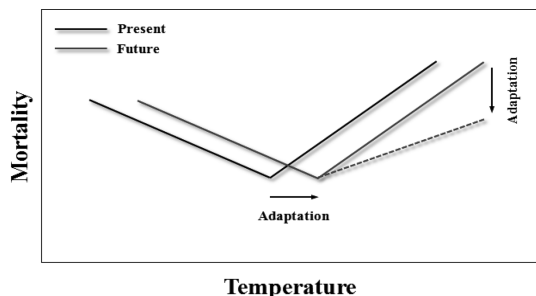
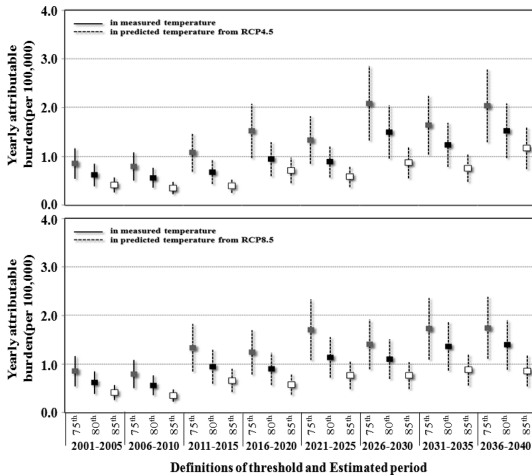


Fig. 2. Mechanism of adaptation in exposure-response curve between summer temperature and mortality.



**Fig. 3.** Yearly attributable death burden (95% confidence interval) from high temperature on death in summer (June-August) in Seoul, 2001-2040, according to definitions of threshold (75<sup>th</sup>, 80<sup>th</sup>, and 85<sup>th</sup> percentile of daily mean temperature in summer season) based on the study period of 1996-2010.

했다.<sup>61)</sup>

이 연구에서 기후변화로 인한 미래 기온상승의 기여사망 추정결과는 여전히 공중보건학적인 관심의 대상이 될 수 있음을 보여준다. 이는 현재 수준에서의 인구수 대비 기여사망의 부담정도보다 미래 수준에서의 인구수 대비 기여사망의 부담정도가 결코 감소하지 않기 때문이다. Fig. 3은 1996년부터 2010년 동안의 임계온도를 하절기 일별평균기온 85%, 80%, 그리고 75% 수준으로 정의하고 임계온도 이상에서의 일별평균기온 1°C 상승으로 인한 RR 추정값을 활용한, RCP4.5 및 RCP8.5에 따른 미래 서울 일별 평균기온 노출의 기여사망을 단위 인구수로 나눈 기여부담을 도식화한 것이다. 여기에서 미래의 임계온도는 해당기간 하절기 일별평균기온의 각각 85%, 80%, 그리고 75% 수준으로 정의될 것이라고 가정하였다. 임계온도 정의에 따른 기여부담은 2001년부터 2010년 사이에 평균적으로 약 인구 10만 명당 0.7명 안팎이나, 2036년부터 2040년 사이에 RCP4.5 및 RCP8.5 모두에서 평균적으로 약 인구 10만 명당 1.5명 안팎 수준까지 약 2배 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3).

## V. 결 론

일반적으로 미래의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생은 현재의 하절기 기온상승으로 인한 사망발생과 다르게 나타날 수 있다. 이는 기후변화가 미래 하절기 기온상승 정도를 높여 사망발생을 높일 수도 있으며, 지역사회의 노령인구 증가가 인구집단 민감도를 높여 사망발생을 높일 수도 있기 때문이다(Table 2). 반면에 에어컨 사용 등 주거 공간 향상, 공중보건 프로그램 등 사회경제적 수준의 향상 및 각종 관련 대책들은 기온상승에 대한 인구집단의 적응(즉, 기온상승으로 인한 임계온도의 유지 및 임계온도 이상에서의 관련성 감소)으로 사망발생을 낮출 수도 있다(Table 3). 하지만 이 연구의 결과는 다양한 미래 영향요인들(즉, 미래사회의 인구수, 사망률 수준, 그리고 적응정도)을 고려할 경우에도 기후변화로 인한 서울의 미래 하절기 기온상승이 지역사회의 사망부담을 2001년부터 2010년 인구 10만 명당 약 0.7명에서 2036년에서 2040년 인구 10만 명당 약 1.5명 안팎수준까지 약 2배 정도 증가시킬 수 있음을 보여준다(Fig. 3).

미래에 대한 다양한 시나리오는 확률적인 의미를 포함하지 않으나 인구학적, 기술적, 정치적, 사회적 그리고 경제발전과 관련한 가능한 미래의 한 상황으로 여겨질 수 있다. 덧붙여 본 연구의 기후변화로 인한 미래 기온상승의 사망부담 추정결과는 미래 기후변화로 인한 여러 가지 시나리오 중의 하나이며, 가능한 미래의 상황에서 안정적인 정책 결정을 내리기 위한 과학적 근거로서 사용될 수 있다. 즉 2010년에서 2040년까지의 연중 하절기 기온상승으로 인한 사망부담 추정결과는 미래의 기온상승 수준, 인구수, 사망률 수준, 그리고 적응을 고려함으로써 향후 지역사회 현황에 적합한 기후변화에 따른 건강정책 및 대책 수립에 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 한국환경정책·평가연구원의 「미래 건강부담 추정의 영향요인 고찰-기후변화에 따른 폭염 증가를 중심으로(No. BA2012-10)」의 연구결과 일부입니다.

## 참고문헌

1. Basu R and Samet JM. Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiol Rev.* 2002; 24: 190-202.
2. Gosling SN, Lowe JA, McGregor GR, et al. Association between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature. *Climatic Change.* 2009; 92: 299-341.
3. Gover M. Mortality during periods of excessive temperature. *Public Health Rep* 1938; 53: 1122-1143
4. Kosatsky T. The 2003 heat wave European heat waves. *Euro Surveill.* 2005; 10: 148-149.
5. Kysely J and Kim J. Mortality during heat waves in South Korea, 1991 to 2005: How exceptional was the 1994 heat wave? *Climate Res.* 2009; 38: 105-116.
6. Schickele E. Environment and fatal heat stroke: an analysis of 157 cases occurring in the army in the U.S. during World War II. *Mil Surg.* 1947; 100: 235-256
7. Stallones RA, Gauld RL, Dodge HJ, Lammers TF. An epidemiological study of heat injury in army recruits. A.M.A. *Arch Ind Health.* 1957; 15: 455-465
8. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Cambridge, University Press. 2007. Cambridge, UK
9. Luber G and McGeheh M. Climate Change and Extreme Heat Events. *Am J Prev Med.* 2008; 35: 429-435.
10. 국립기상연구소. IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011. 2011.
11. Campbell-Lendrum D, Woodruff R. 2007. *Climate Change: Quantifying the Health Impact at National and Local Levels.* Geneva: World Health Organization.
12. Costello A, Abbas M, Allen A, Ball S, Bell S, Bellamy R, et al. Managing the health effects of climate change: Lancet and University College London Institute for Global Health Commission. *Lancet.* 2009; 373(9676): 1693-1733.
13. Ebi KL, Gamble JL. Summary of a workshop on the development of health models and scenarios: strategies for the future. *Environ Health Perspect.* 2005; 113: 335-338.
14. Huang C, Vaneckova P, Wang X, FitzGerald G, Guo Y, Tong S. Constraints and barriers to public health adaptation to climate change: a review of the literature. *Am J Prev Med.* 2011; 40(2): 183-190.
15. WHO. 2009. *Protecting Health from Climate Change: Global Research Priorities.* Geneva: World Health Organization.
16. Menne B, Ebi KL. 2006. *Climate Change and Adaptation Strategies for Human Health.* Darmstadt:Steinkopff.
17. Ebi KL. Healthy people 2100: modeling population health impacts of climate change. *Climatic Change.* 2008; 88: 5-19.
18. Frumkin H, McMichael AJ. Climate change and public health: thinking, communicating, acting. *Am J Prev Med.* 2008; 35: 403-410.
19. Kinney PL, O'Neill MS, Bell ML, Schwartz J. Approaches for estimating effects of climate change on heat-related deaths: challenges and opportunities. *Environ Sci Policy.* 2008; 11: 87-96.
20. Donaldson G, Govats RS, Keatinge WR, McMichael AJ. Heat- and Cold-related mortality and morbidity and climate change. In: Expert Group on Climate Change and Health in the UK, eds. *Health Effects of Climate change in the UK.* London, England: UK Department of Health; 2001: 70-80.
21. McMichael AJ, Woodruff RE, Whetton P, et al., eds. *Human Health and Climate Change in Oceania: A Risk Assessment 2002.* Canberra: Commonwealth of Australia; 2003.
22. Dessai S. Heat stress and mortality in Lisbon Part II. An assessment of the potential impact of climate change. *Int J Biometeorol.* 2003; 48: 37-44.
23. Hayhoe K, Cayan D, Field CB, et al. Emissions pathways, climate change, and impacts on California. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2004; 101: 12422-12427
24. Gosling SN, McGregor GR, Lowe JA. Climate change and heat related mortality in six cities Part 2: climate model evaluation and projected impacts form changes in the mean and variability of temperature with climate change. *Int J Biometeorol.* 2009; 53: 311-51.
25. Huang C, Barnett AG, Wang X, et al. Projecting Future Heat-Related Mortality under Climate Change Scenarios: A Systematic Review. *Environ Health Perspect.* 2011; 119: 1681-1690.
26. 박정임 등. 기후변화가 건강에 미치는 영향 및 적응 대책 마련. 환경부, 2005.
27. 이희성 등. 우리나라 기후변화의 경제학적 분석(II). 환경부, 2011.
28. Kim H, Ha J, Park J. High temperature, heat index, and mortality in 6 major cities in South Korea.

- International Arch Environ Occup Health. 2006; 61: 265-270.
29. Chung JY, Honda Y, Hong YC, Pan XC, Guo YL, Kim H. Ambient temperature and mortality: An international study in four capital cities of East Asia. *Sci Total Environ*. 2009; 408: 390-396.
  30. Ha J, Kim H, Hajat S. Effect of previous-winter mortality on the association between summer temperature and mortality in South Korea. *Environ Health Perspect*. 2011; 119: 542-546.
  31. Barnett AG, Tong S, Clements AC. What measure of temperature is the best predictor of mortality? *Environ Res*. 2010; 110: 604-611.
  32. 기상청. 기후변화 시나리오 이해 및 활용사례집. 2011.
  33. Bruzzi P, Green SB, Byar DP, et al. Estimating the population attributable risk for multiple risk factors using case-control data. *Am J Epidemiol*. 1985; 122: 904-914.
  34. Voorhees AS, Fann N, Fulcher C, et al. Climate Change-Related Temperature Impacts on Warm Season Heat Mortality: A Proof-of-Concept Methodology Using BenMAP. *Environ Sci Technol*. 2011; 45: 1450-1457.
  35. Armstrong BG, Chalabi Z, Fenn B et al. Association of mortality with high temperatures in a temperature climate: England and Wales. *J Epidemiol Comm Health*. 2011; 65: 340-345.
  36. de Boor C. A practical Guide to Splines. Springer, 1978, New York.
  37. Armstrong B. Models for the Relationship Between Ambient Temperature and Daily Mortality. *Epidemiology*. 2006; 17: 624-631.
  38. Akaike H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principal. In: Petrov BN, Caski F, editors. Second International Symposium on Information Theory. Budapest: Akademiai Kiado; 1973. pp, 267. 81.
  39. Honda Y, Kabuto M, Ono M, Uchiyama I. Determination of optimum daily maximum temperature using climate data. *Environ Health Prev Med*. 2007; 12: 209-216.
  40. McGeehin MA and Mirabelli M. The potential impact of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States. *Environ Health Perspect*. 2001; 109: 185-189.
  41. Davis RE, Knappenberger PC, Novicoff WM, Michaels PJ. Changing heat-related mortality in the United States. *Environ Health Perspect*. 2003; 111: 1712-1718.
  42. Davis RE, Knappenberger PC, Novicoff WM, Michaels PJ. Decadal changes in summer mortality in U.S. cities. *Int J Biometeorol*. 2003; 47: 166-175.
  43. Kysel J and Kriz B. Decreased impacts of the 2003 heat waves on mortality in the Czech Republic: an improved response? *Int J Biometeorol*. 2008; 52: 733-745.
  44. Centers for Disease and Control and Prevention. Heat-related illnesses and deaths-United States, 1994-1995. *MMWR*. 1995; 44: 465-468.
  45. Centers for Disease and Control and Prevention. Heat-related mortality-Chicago, July 1995. *MMWR*. 1995; 44: 577-579.
  46. Centers for Disease and Control and Prevention. Heat-wave-related mortality - Milwaukee, Wisconsin, July 1995. *MMWR*. 1996; 45: 505-507.
  47. Kilbourne EM, Choi K, Jones TS, Thacker SB. Risk factors for heatstroke: a case-control study. *JAMA*. 1982; 247: 3332-3336.
  48. Rogot E, Sorlie PD, Backlund E. Air-conditioning and mortality in hot weather. *Am J Epidemiol*. 1992; 136: 106-116.
  49. Ha J and Kim H. Changes in the association between summer temperature and mortality in Seoul, South Korea. *Int J Biometeorol*. 2012; DOI 10.1007/s00484-012-0580-4.
  50. Kovats RS, Hajat S. Heat stress and public health: a critical review. *Annu Rev Public Health*. 2008; 29: 41-55.
  51. O'Neill MS, Ebi KL. Temperature extremes and health: impacts of climate variability and change in the United States. *J Occup Environ Med*. 2009; 51: 13-25.
  52. Hajat S, O'Connor M, Kosatsky T. Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection. *Lancet*. 2010; 375: 856-863.
  53. Kalkstein L, Greene J. An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S. cities and the possible impacts of a climate change. *Environ Health Perspect*. 1997; 105: 84-93.
  54. Moseley PL. Mechanisms of heat adaptation: thermotolerance and acclimatization. *J Lab Clin Med*. 1994; 123: 48-52.
  55. O'Neill M, Zanobetti A, Schwartz J. Disparities by race in heat-related mortality in four US cities: the role of air conditioning prevalence. *J Urban Health*. 2005; 82: 191-197.
  56. Kinney PL, O'Neill MS, Bell ML, Schwartz J. Approaches for estimating effects of climate change on heat-related deaths: challenges and opportunities. *Environ Sci Policy*. 2008; 11: 87-96.

57. Gosling SN, Lowe JA, McGregor GR, Pelling M, Malamud BD. Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature. *Clim Change*. 2008; 92: 299-341.
58. Dessai S. Heat stress and mortality in Lisbon part II. An assessment of the potential impacts of climate change. *Int J Biometeorol*. 2003; 48: 37-44.
59. Gosling S, McGregor G, Lowe J. Climate change and heat-related mortality in six cities Part 2: climate model evaluation and projected impacts from changes in the mean and variability of temperature with climate change. *Int J Biometeorol*. 2009; 53: 31-51.
60. Hajat S and Kosatky T. Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity. *J Epidemiol Comm Health*. 2010; 64: 753-760.
61. Davis RE, Knappenberger PC, Novicoff WM, Michaels PJ. Decadal changes in summer mortality in U.S. cities. *Int J Biometeorol*. 2003; 47: 166-175.