

지난 100년 동안 서울시에 발생한 강한 열파 패턴과 노인사망자에 미치는 영향

최광용*

Patterns of Strong Heat Waves within the Seoul Metropolitan Area and Its Impacts on Elderly Mortality Based on the Last 100 Year Observations

Gwangyong Choi*

요약 : 이 연구에서는 지난 100년(1908~2007) 동안 서울에서 발생한 열파의 변화추세와 극심한 열파 발생 시 도심내 열환경과 사망자의 시공간적 패턴을 분석하고자 한다. 최근의 온난화 경향에도 불구하고 여름철 강수량 증가에 의해 서울시의 열파 발생빈도 및 강도에는 뚜렷한 변화경향이 관찰되지 않는다. 전례 없이 강한 열파가 발생한 1994년 7월의 자동기상관측 및 Landsat TM 위성 영상 추출 열분포 자료들은 도심내 형성되는 고온의 열환경에 의해 노인 질병 사망자 수가 더욱 증가하였음을 잘 보여준다. 이 연구는 차후 도심 정비시 열환경 분포를 고려해야 하는 생리기후학적 근거를 제시하고 있다.

주요어 : 열파, 도시화, 열환경, 사망자, 원격탐사, 서울

Abstract : In this study, trends of heat waves in the populous Seoul metropolitan area over the last 100 years (1908-2007) and spatio-temporal patterns of extreme heat waves and excessive human mortality are examined. In spite of recent global warming, there is no observable increasing or decreasing pattern in the frequency and intensity of heat waves in Seoul due to increases of summer precipitation. Among numerous episodes over the last 100 years in Seoul, 1994 summer is recognized as the unprecedented, most extreme hot episode with long-lasting, intense heat waves. Meteorological data observed at the Automatic Weather Stations (AWS) and land surface temperature data derived from Landsat TM satellite imagery in July 1994 reveal that extreme heat waves cause more abnormal increase of elderly mortality in the urbanized areas than in the surroundings covered with more vegetation. This study provides bioclimatological evidences of why urban thermal environments should be seriously considered in the future urban revitalization planning.

Key Words : heat waves, urbanization, thermal environments, human mortality, remote sensing, Seoul

* 강원대학교 환경과학과 연구교수(Research Professor, Department of Environmental Science, Kangwon National University),
tribute@hanmail.net

1. 서론

과거에는 주로 저기압과 관련된 여름철 집중호우나 태풍, 장마전선 등이 여름철 재산피해를 초래하는 주요한 자연재해로 인식되어 왔다. 2003년 유럽(Stott *et al.*, 2004; UNEP, 2004)이나 1995년 미국 시카고(Changnon *et al.*, 1996)에 발생한 단기간의 강한 열파(heat waves)에 의해 사망자가 급증하고 사회경제적인 피해가 발생하면서 최근에는 고기압이 우세한 맑은 날에 발생하는 열파도 자연재해로서 전 세계적인 주목을 받게 되었다. 여름철 맑은날 기온과 습도가 높은 경우에는 인체는 주변 열환경에 반응하여 모세혈관을 확장시키고, 심장 박동수를 증가시켜 열에너지 방출을 극대화시키려고 한다(Tromp, 1980). 무더운 열환경에서 흘리는 땀도 증발하면서 피부 주변의 열을 빼앗아 체온을 낮추는데 도움을 준다. 그러나, 무더운 상태의 열파가 강하게 수일 동안 지속되면 이러한 인체 내부의 잉여 열에너지를 체외로 방출시키려는 생리현상이 제약 받아 노약자들을 중심으로 사망에 이르게 된다. 이와 같이 인간 사망자를 유발하는 여름철 고온다습한 무더위를 일반적으로 “열파(heat waves)”라고 하며(Choi, 2006), 우리나라 기상청에서는 이를 “폭염”이라고 새롭게 명명하기도 하였다(<http://www.kma.go.kr>). 우리나라에서도 열파에 의한 인명 피해가 보고되면서 비정상적으로 여름철 고온다습한 대기상태도 자연재해이라는 인식이 최근 확산되고 있다(Choi *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2008b). 열파 발생 시에는 도심을 중심으로 전력 사용량이 급증한다. 그러나, 전력공급의 특성상 공급 가능 상한선을 넘어서게 되면 과열로 인하여 모든 전력공급이 차단된다. 이때 열파에 취약한 노약자 계층들은 사망위험에 놓이게 된다. 또한 열파 발생시 가축과 가금류의 생식력은 감소하게 되고, 극심한 열파가 장시간 지속할 때 적절한 냉방을 해주지 않으면 집단 폐사하기도 한다. 최근 우리나라에서도 이러한 전력공급 차단 및 가금류의 집단 폐사나 산란을 저하 사례가 언론에 보고되고 있다(e.g. Kyongbukilbo, August 6, 2010).

북미와 유럽에서는 이미 20세기 초반부터 미국을 중

심으로 체감온도 지수가 개발되었고(e.g. Houghton and Yagloglou, 1923; Thom, 1959), 각 열파 사례별 사망자 발생 패턴에 대한 수많은 연구들이 진행되었다(e.g. Smoyer, 1998). 상대적으로 우리나라에서 열파가 정의되고 기후학적 또는 예방의학적 연구가 진행되기 시작한 것은 21세기 초반에 이르러서이다. 연구 초기단계에서는 생리기후 체감온도 지수를 이용한 여름철 무더위의 시공간적 패턴에 대한 정보가 제시되었다(Choi *et al.*, 2002). 이후, 여름철 무더위가 심혈관 관련 질병 사망자를 증가시킨다는 예방의학적 관점의 연구결과가 보고되기 시작하였다(Choi *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2008b). 그러나 강한 무더위 열파에 대한 구체적인 정의와 정보체계가 마련된 것은 2000년대 중반에 이르러서이다. 몇몇 연구들은 체감온도 지수의 증가에 따라 질병 초과사망자가 발생하는 임계치를 중심으로 우리나라에 적합한 독자적인 열파 정보 단계를 제시하였다(Choi, 2006; Park *et al.*, 2008a, 2009).

최근에는 각 도시 별 사망자와 폭염과의 상관성(Lee *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2009)이나 열파 발생시 종관기상상태(Kim and Lee, 2007; Kim *et al.*, 2007, 2008; Kysely and Kim, 2009; Kysely *et al.*, 2010) 등에 관한 연구들이 활발하게 보고되고 있다. 이러한 대부분의 열파에 대한 연구들은 남한 전체 규모나 도시 전체 규모의 현상을 분석한 것으로 도시 내부 규모의 국지적 생리기후환경에 대한 연구는 거의 이루어진 바가 없다. 일부 연구들은 지상 정규기상관측 자료(e.g. Boo *et al.*, 1999; Kim and Baik, 2002), 이동 관측 자료(Park, 1986), 위성영상 자료(e.g. Lee, 1993; Kwon, 2006)를 이용하여 대도시 도시열섬의 강도에 대한 연구 결과들을 보고하였다. 특히 위성영상을 이용한 연구들에서는 도시피복에 따른 열환경의 차이에 대한 분석들이 이루어졌다. 그러나 대부분 계절 단위의 평균적인 기온의 공간분포나 자료를 이용할 수 있는 봄철과 가을철에 주로 초점이 맞추어져 있고, 여름철 열파와 같은 극한 생리기후현상 발생시의 도시 열환경 분포에 대한 연구는 구체적으로 이루어지지 않았다.

인구가 밀집된 대도시지역에서 강한 열파가 발생하면 한꺼번에 많은 사망자가 발생할 수 있어 인구수가

적은 농촌에 비하여 그 영향력이 더욱 가시화 될 수 있다. 우리나라의 경우 현재 전체인구의 약 50%가 수도권에 밀집되어 있고, 특히 서울에는 25%의 인구가 집중되어 전 세계적으로도 인구밀도가 높다. 최근 저출산 및 고령화 현상으로 2009년 기준 서울 전체인구의 9.2%는 노인계층으로 구성되어 있다(http://kostat.go.kr/). 특히 심혈관계 만성질환을 가진 노약자는 열파에 의한 사망에 취약하기 때문에 우리나라 서울과 같이 고령화된 인구가 많은 대도시는 강한 열파에 의해 단기간에 큰 피해를 입을 수 있다.

현재 북미 및 유럽의 대도시에서는 열파 발생시 냉방장치가 설치된 곳을 시민들이 이용할 수 있도록 열파 쉼터 네트워킹을 구축하는 노력들이 진행되어 오고 있다(Sheridan and Kalkstein, 2004). 우리나라에서는 아직 열파 연구 초기단계에 있기 때문에 도시내부의 열파 발생시 열환경에 대한 정보가 거의 제시되어 있지 않다. 특히 도심 재개발이나 주변지역 개발계획 수립 시 주로 경제논리만이 고려되기 때문에 눈에 보이지 않는 도시 열환경에 대한 정보들은 거의 고려대상이 아니다. 그러나 극한 생리기후현상이 발생하였을 때의 도시 열환경에 대한 정보는 여름철 에너지 사용이나 국민 보건적인 측면에서 매우 중요하다.

본 연구에서는 지난 100년(1908~2007) 동안 서울에서 발생한 열파발생 빈도와 강도의 시계열을 분석하여 기후평균 변화에 따른 열파 발생빈도 변화량을 산출하고자 한다. 또한 본 연구에서는 서울에서 전례없이 강한 열파가 발생하였을 때 서울 도심 내부와 도시외곽의 열환경 분포와 지표피복과의 관련성 및 노인 질병 사망자 발생 패턴에 미친 영향을 분석하고자 한다.

2. 자료 및 연구방법

1) 서울의 100년(1908~2007)간 열지수 자료

본 연구에서는 우리나라 여름철 체감온도 지수와 질병 초과 사망자와의 경험적인 관계를 기반으로 구축된 Choi(2006)의 열파 경보체계를 바탕으로 열파 발생일을 추출하였다(Table 1). Choi(2006)는 고온 발생시 습도의 효과를 결합한 체감온도 지수인 열지수(Heat Index; Rothfusz, 1990)를 바탕으로 일최고 열지수가 3일 동안 35.5℃, 38.5℃, 41.5℃ 이상을 나타낼 때를 각각 열파일, 강한 열파일, 극심한 열파일로 정의하였다. Table 1은 각 단계별 열파 발생에 의해 나타나는 초과 노인사망자 차이를 잘 보여준다. 일최고 열지수를 추출하기 위하여 일차적으로 지난 100년(1908~2007) 동안 서울 종로구에 위치한 정규관측소(Figure 1)에서 관측한 6 시간별(3시, 9시, 15시, 21시) 기온 및 상대습도 자료를 이용하여 열지수를 산출하였다. 열지수의 산출식은 Choi *et al.*(2005)에 상세하게 제시되어 있다. 그 후, 일최고 열지수와 일최고 열지수가 나타낸 때의 실시간 기온 및 상대습도 등의 자료를 동시에 추출하였다. 산출된 일최고 열지수 자료를 바탕으로 3일 동안 해당 임계치를 연속적으로 넘는 경우를 각 강도별 열파일로 추출하였다. 그 후 매년마다의 열파일 발생빈도를 산출하여 100년 동안의 시계열 자료를 분석하였다.

Table 1. Definitions of heat waves in Korea (adopted from Choi (2006)).
한국의 열파 정의(최광용(2006)의 분류 체계 적용).

Categories of heat waves	Daily Maximum Heat Index (DMHI)	Duration	Excessive mortality*
Heat wave days	35.5°C ≤ DMHI < 38.5°C	3 days	14
Strong heat wave days	38.5°C ≤ DMHI < 41.5°C		92
Extreme heat wave days	41.5°C ≤ DMHI		203

* per 1 million of baseline elderly (≥65 years old) population

2) 자동기상관측 자료

종로구에 위치한 서울의 정규관측소 자료에서 추출한 열파일 발생빈도 시계열에 따르면, 열파 특이해인 1994년 여름철 자료를 세부적으로 더 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 이 시기의 도심내 열환경을 평가하기 위하여 자동기상관측 자료를 사용하였다. 우리나라에서 자동기상시스템(Automatic Weather System; AWS)이 보급되기 시작한 것은 1990년대 초반이지만, 서울 도심내에 20개 이상의 자동기상관측 지점이 구축된 것은 1995년에 와서이다. 1994년까지 서울 도심 내에는 서울(AWS #508; 37°34' N, 126°58' E, 87m), 서울대(AWS #509; 37°28' N 126°57' E, 120m), 여의도(AWS #510; 37°31' N, 126°56' E, 10m) 등 총 3개의 관측지점만이 구축되었다(Figure 1). 본 연구에서는 1994년 도심내 열환경을 평가하고자 3개 지점 중 도시

중심업무지구에 인접한 서울(AWS #508)과 여의도(AWS #510) 자료를 서울에 인접한 도시화가 덜 된 지역에 위치한 고양(AWS #540; 37°41' N, 126°52' E, 80m)과 사능(AWS #541; 37°39' N, 127°11' E, 30m)의 자료와 비교·분석하였다. 이 자동기상 관측지점에서는 기온(일 최고, 일 평균, 일 최저), 강수량, 풍향 및 풍속 자료 등이 관측된다. 고온발생시의 상대습도의 변화는 체감온도의 증감에 상당한 영향을 준다. 그러나, 도시 내부에서도 지표피복에 따라 상대습도는 매우 달라지기 때문에 종로 지점의 상대습도 자료를 다른 도심 내 지점에 적용할 수는 없다. 자동기상관측지점에서는 체감온도 산출과 관련된 상대습도 자료는 측정하지 않기 때문에, 본 연구에서는 종로 지점자료에서 이미 서울에 열파가 발생하였을 때의 일 최고 또는 일 최저기온 자료를 주로 분석하였다.

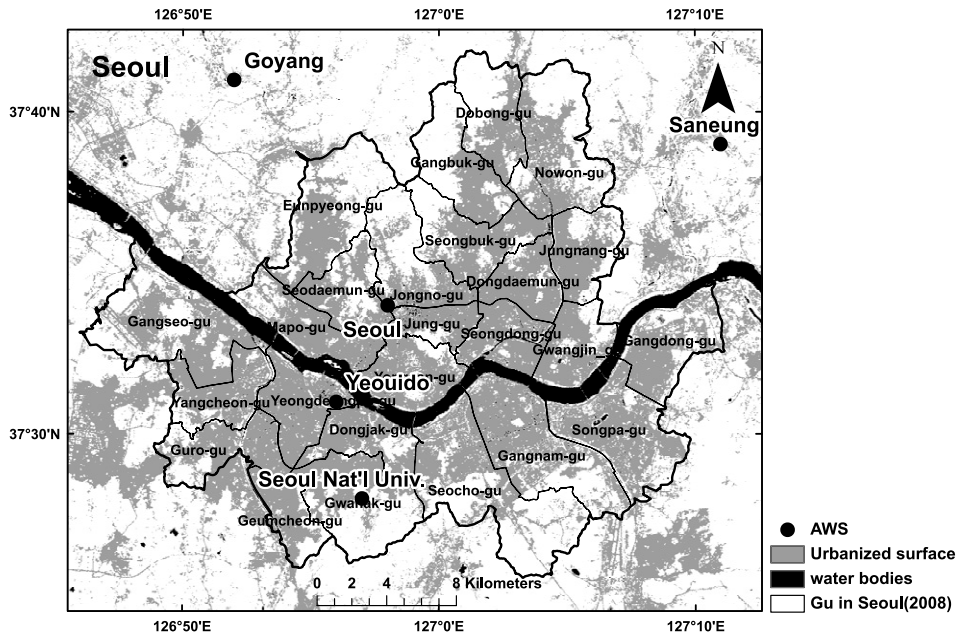


Figure 1. Land use derived from Landsat TM imagery (July 26 in 1994) and locations of four Automatic Weather Stations (AWS; Yeouido, Seoul National University, Goyang, and Saneung in 1994) and a regular weather station (Seoul; for the period of 1908-2007) in the Seoul metropolitan area and in the surroundings in the Republic of Korea. Polygons in the map represent district (called Gu in Korea) boundaries within the Seoul metropolitan area in 2008. 1994년 서울과 주변 지역의 Landsat TM 위성영상에서 추출한 토지 이용 패턴과 서울 정규 기상 관측소(1908~2007년)와 4개의 자동기상관측소(1994년)의 위치.

3) Landsat TM 위성영상

강한 열파 발생해인 1994년의 여름철 도심내 열환경을 분석하기 위하여 Landsat TM (Thematic Mapper) 영상에서 지표온도자료를 추출하였다. 일반적으로 여름철 위성영상은 구름에 의한 오염 때문에 연중 제공되는 양호한 영상의 수가 매우 제한되어 있다. 가령, 한반도의 경우 연중 약 40일 정도만이 구름이 없는 맑은날로 기록된다. 본 연구에서는 지난 100년 중 전례 없이 강한 열파 발생일(7월 23~25일; Choi *et al.*, 2005)에 인접한 1994년 7월 26일 한반도 중부지방을 포괄하는(path:116, row:34; swath: 185km) Landsat-5 TM 영상을 분석하였다.

Landsat-5 TM에서 1~5번과 7번 밴드 영상은 30m 픽셀의 공간해상도를 가지고 있고, 지표온도를 추출할 수 있는 6번 열밴드(thermal band; 10.42-12.50 μ m)의 공간해상도는 이보다 낮은 120m이지만, 수십 킬로미터 규모의 서울 도심 내부의 전반적인 열환경 분포 패턴을 파악하는 데에는 무리가 없다. 다만, Landsat TM 영상촬영 위성센서의 한반도 통과시각이 오전 10시 30분경이므로 일최고 열지수가 주로 기록되는 오후 2~3시경과는 다소 차이가 있다. 그러나, Landsat 위성영상의 경우 한달에 2회 정도 자료가 가용하고 통과 시각은 정해져 있기 때문에 1994년 이 영상자료가 강한 열파 발생시 서울 도심내 열환경을 상세하게 평가할 수 있는 유일한 자료이다.

본 연구에 사용된 원 영상은 UTM 좌표체계로 되어 있지만, 이미 보정된 다른 영상(10m 공간해상도)을 사용하여 영상 대 영상 기하보정을 수행하였다. 영상에 공간적으로 골고루 찍은 총 24개의 지상기준점(Ground control point; GCP)에서 상대적인 총오차(RMSE=1.0)를 줄일 수 있는 12개의 GCP를 선택하여 최근린내삽법(Nearest neighboring)으로 영상을 재배열하였다. 주로 지형효과가 거의 없는 서울 도심내의 열환경을 평가하기 때문에 지형보정은 실시하지 않았다. 구름, 에어로졸, 수증기 등의 대기 장애요소들에 의해 지구복사 열적외선이 흡수될 경우 위성에서 관측한 지표온도는 실제 지상관측 온도보다 낮을 수 있다. Landsat TM은 단일 열밴드로는 이러한 요소들에 관한

대기보정이 가능하지 않다. 그러나, 열파는 주로 맑은 날 발생하여 1994년 7월 26일의 경우도 서울지역 운량이 2.8의 작은 값을 나타냈기 때문에 대기 장애요소들에 의한 지표기온의 과소평가 정도는 심각하지는 않다고 판단하였다. 보완적으로 분석 시에는 최대한 이러한 대기보정을 하지 않은 효과를 고려하기 위해 4개의 자동기상관측 기온자료(오전 10시와 11시 값의 평균)와 비교하였다.

이와 같이 전처리 된 Landsat-5 TM 영상에서 열적외선 밴드의 화소값(Digital Number; DN)을 방사휘도(Radiance; L_{λ})로 변환한다. 방사휘도를 구하는 식은 아래와 같다(Chander and Markham, 2003; Chander *et al.*, 2009).

$$L_{\lambda} = \frac{(L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda})}{(QCAL_{\max\lambda} - QCAL_{\min\lambda})} \times (QCAL - QCAL_{\min}) + L_{\min\lambda}$$

이 공식에서 $QCAL_{\max\lambda}=255$, $QCAL_{\min\lambda}=0$ 값들이 사용되었고, $L_{\max\lambda}$ 와 $L_{\min\lambda}$ 은 각각 영상의 최대, 최소 DN값을, $QCAL$ 은 각 픽셀의 DN값을 나타낸다. 산출된 방사휘도 값으로 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration; NASA)에서 제공하는 온도 변환 경험식을 사용하여 지표 온도값을 계산하게 된다. 지표온도를 추출하는 방법에는 RESTEC, Quadratic 방법 등도 있으나, 본 연구에서는 실측치와 높은 상관관계를 보인다고 알려진 NASA의 경험식을 사용하였다. 지표온도(T(K); Kelvin)를 구하는 경험식은 아래와 같다(Chander and Markham, 2003; Chander *et al.*, 2009).

$$T(K) = \frac{c_2}{\ln\left(\frac{c_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}$$

이 경험식에서 L_{λ} 은 앞에서 구한 방사휘도 값이고, Landsat-5 TM의 열밴드 경우 보정상수 값은 각각 $c_1=607.76 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\mu\text{m})$, $c_2=1260.56\text{K}$ 이다.

도시의 열환경은 식생피복과 밀접한 관련성이 있다. 식생의 활력도와 지표온도와의 상관성을 분석하기 위

해 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)를 산출하여 지도화 하였다. Landsat TM의 가시광선(V) 파장 밴드(band 3: 0.63~0.69 μ m)와 근적외선(NIR) 파장 밴드(band 4: 0.76~0.90 μ m) 자료를 이용한 NDVI 산출식은 아래와 같다(Rouse *et al.*, 1974).

$$NDVI = \frac{NIR(band4) - V(band3)}{NIR(band4) + V(band3)}$$

그 후, 서울 도심 내부와 외부 사이의 지표온도의 상대적 편차의 공간 분포패턴을 주로 분석하였다. 서울 도심 내부의 각 구별(2008년 서울시 행정구역 기준)로 평균한 지표온도와 NDVI값에서 회귀식을 산출하여 식생 피복량에 따른 지표온도 변화율을 산출하였다. 서울 외곽의 도시화가 덜 된 지역으로는 고양시 덕양구, 양주시, 남양주시, 하남시, 과천시, 광명시, 김포시로 정하여 행정구역 안의 평균 지표온도와 NDVI값을 산출하여 서울 도심 내부의 값들과 비교하였다. 본 연구에서 추출한 회귀식은 95% 이상의 유의수준을 가질 때 통계적으로 유의미한 것으로 판단하였다.

4) 질병사망자 자료

본 연구에서는 이전 연구결과(Choi *et al.*, 2005)를 바탕으로 통계청에서 집계한 서울 도심내 각 구별로 열파 발생시 취약한 65세 이상 노인계층의 여름철 7~8월 총 일별 질병사망자를 산출하였다. 1995년 이전 자료는 세계보건기구에서 제시한 9차 국제질병 사인분류표 질병사망자 코드번호(001~909), 그 이후에는 10차 국제질병 사인분류표 질병사망자 코드번호(A00~R99)를 사용하였다. 그 후, 매년의 7월 1일의 인구주택총조사에서 수집된 각 구별 노인인구를 자료를 바탕으로 산출한 서울시 모든 구 평균인구(2만 명)를 기준으로 총 사망자 수를 표준화하여 비교하였다. 본 연구에서는 주로 강한 열파가 오래 지속적으로 발생한 1994년 여름철(7~8월) 서울시 각 구별 질병사망자 자료를 지표온도와 정규식생지수 평균값과 비교·분석하였다.

3. 100년(1908~2007)간 서울시 열파일 변화 추세와 민감도

전세계 공통적으로 연 평균기온의 경우 1930~1940년대에 일부 고온기를 나타내다가 이후에는 상승추세가 둔화되고, 1980년대 후반 이후부터 다시 뚜렷하게 상승하는 것이 일반적인 변화경향이다(IPCC, 2007). 서울의 경우에는 1930~1940년대의 고온기는 나타나지 않으나 연 평균기온은 20세기 후반에 뚜렷한 증가 추세를 보인다(Figure 2a). 특히 1980년대 후반 이후에는 장기간 100년간 연 평균기온(11.6℃)에 비하여 대체로 1~2℃ 정도 높게 나타났다. 이러한 최근 온난화의 경우에도 불구하고 지난 100년간(1908~2007) 서울시 열파일, 강한 열파일, 극심한 열파일 발생빈도의 시계열에서는 뚜렷한 증가 또는 감소 등의 추세가 관찰되지 않는다(Figure 2b). 열파일 발생빈도의 경우에는 1930년대와 1940년대에 다소 발생빈도가 높게 나타나지만, 1980년대 후반 이후에는 1994년을 제외하면 1950~1980년대에 비하여 발생빈도가 높게 나타나지 않았다. 모든 등급을 누적한 연 총 열파일 발생빈도는 1994년에 26일로 가장 높았으며, 1939년에 20일, 1943년과 1973년에 15일, 1930년에 12일 순으로 높게 나타났다. 일최고 열지수가 3일 동안 35.5~38.5℃ 지속되었던 열파일은 1939년 18일, 1943년 15일, 1973년 13일로 높았지만, 3일 동안 38.5~41.5℃ 강한 열파일의 발생빈도는 오히려 1994년에 13일로 가장 높고, 1978년 5회였고, 나머지 대다수 해에는 2일 이하로 상대적으로 낮게 나타났다. 특히, 1994년의 경우에는 이례적으로 일최고 열지수가 3일 동안 41.5℃ 이상 지속되었던 극심한 열파일도 1회 발생하였다.

지난 100년 동안의 열파가 주로 발생하는 여름철 평균기온 및 총 누적 강수량의 시계열 변화를 살펴보면, 열파 발생일의 변화가 뚜렷하지 않았던 이유를 알 수 있다. 우리나라 6개 관측 지점(서울, 인천, 강릉, 대구, 부산, 목포)의 연 평균기온은 지난 100년간(1908~2007) 약 1.9℃ 상승하였다. 특히 서울의 경우에는 도시화 효과로 인하여 기온상승률은 2.4℃/100년으로 높게 나타났다. 겨울철(12~2월)에 월별 평균기온은

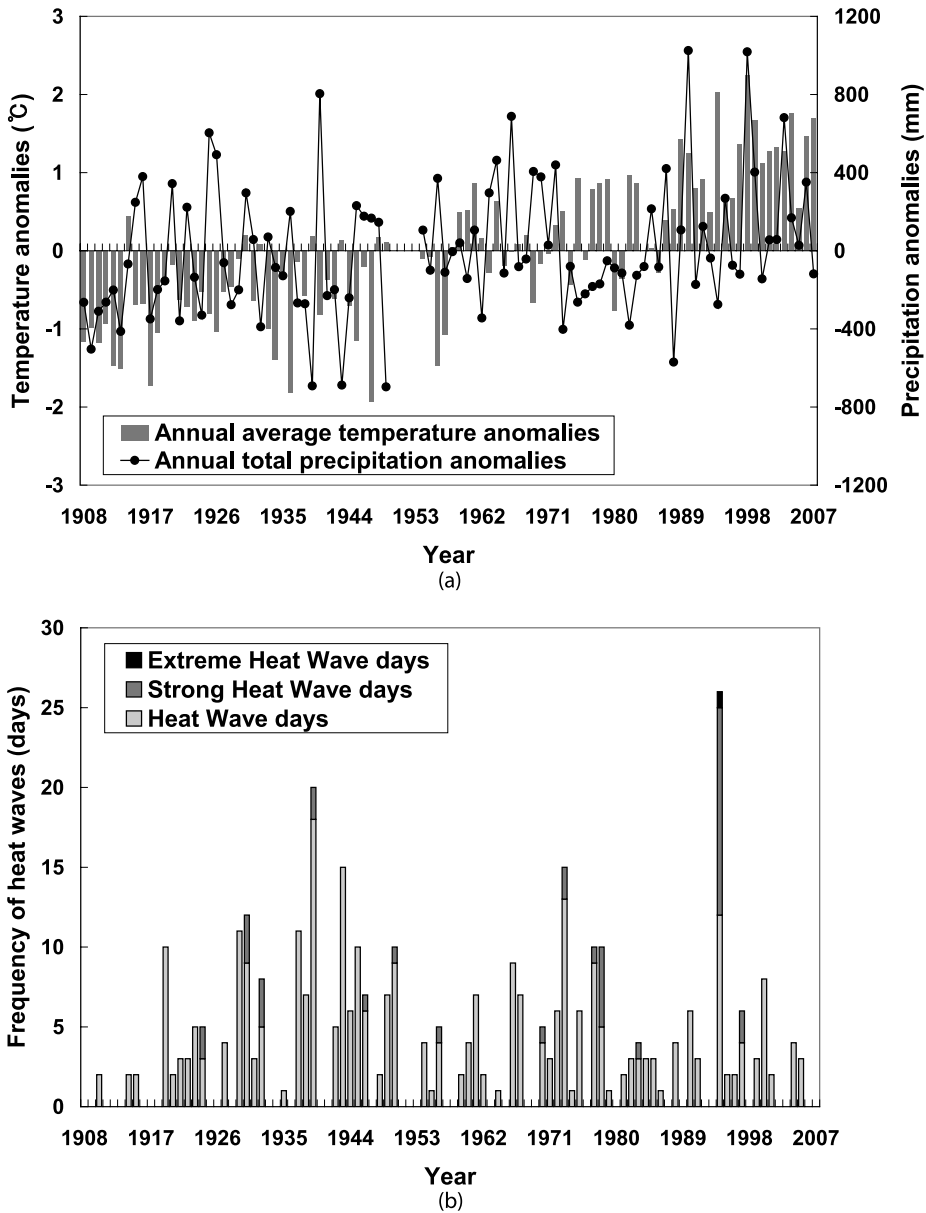


Figure 2. Inter-annual variations of annual average surface air temperature and annual total precipitation anomalies (a) and of annual total frequency of heat wave days, strong heat wave days and extreme heat wave days (b) in Seoul over the last 100 year period (1908-2007). Climatic anomalies are calculated based on the data for the entire 100 year period. 지난 100년(1907~2008) 동안의 서울의 연 평균 기온 및 연 총 강수량의 아노말리 (a)와 열파일, 강한 열파일, 극심한 열파일의 연 총 발생빈도(b)의 경년변화.

3.23~3.40°C/100년의 높은 상승률을 보였다(Figure 3a). 이 추세들은 통계적(99% 유의수준)으로 유의미하

다. 반면 열파가 주로 발생하는 여름철(7~8월)의 경우에는 기온상승률이 0.13~0.14°C/100년으로 상대적으

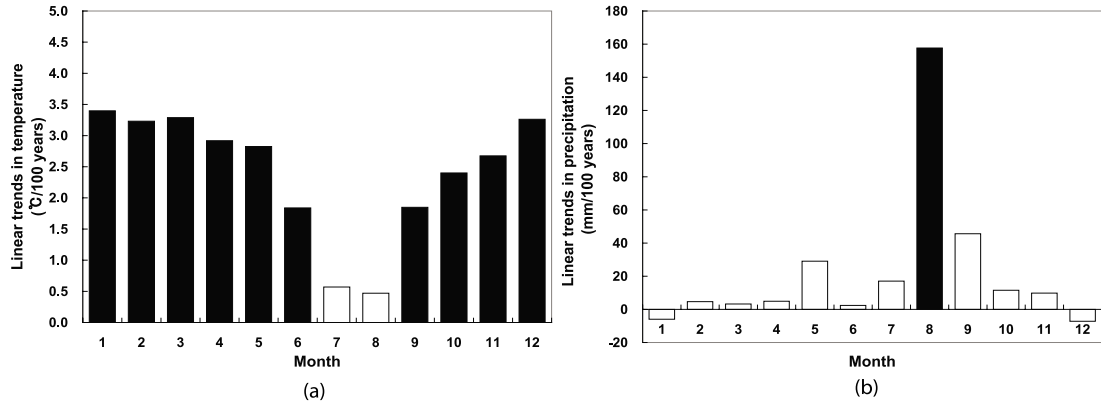


Figure 3. Linear trends of monthly average surface air temperature (°C/100 years) (a) and monthly total precipitation (mm/100 years) (b) over the last 100 years (1907-2008) in Seoul. Black bars are statistically significant at the 95% level, while white bars are not statistically significant. 지난 100년(1908~2007) 동안의 서울의 월 평균 기온(°C/100년)(a)과 월 총 강수량(mm/100년)(b)의 일차 추세 변화율.

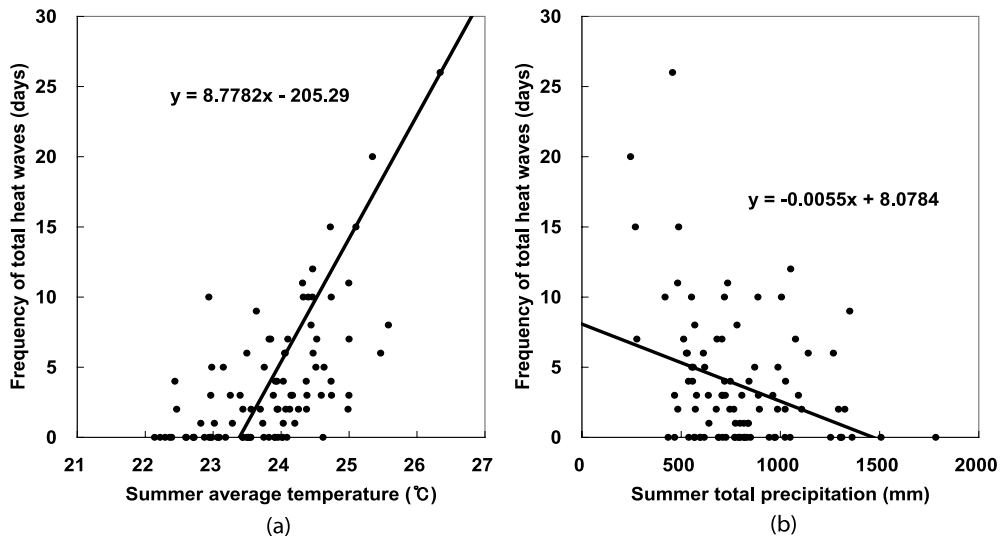


Figure 4. Sensitivity of occurrences of heat wave days to summer average temperature (a) or to summer total precipitation (b) in Seoul, 1907-2008. The regression lines indicate the first eigenvector of the principal component analyses that considers bidirectional errors for both x and y variables. 서울의 여름철 평균기온(a) 또는 총 강수량(b)에 대한 열파일 발생의 민감도(1907~2008).

로 작고, 이 상승률의 통계적 유의성도 낮다. 즉, 지구 온난화 경향에 비추어 서울의 여름철 평균기온은 아직 변화가 뚜렷하지 않아 극한 고온현상인 열파일 발생빈도도 뚜렷한 변화를 보이지 않음을 알 수 있다. 그 주

요한 이유는 우리나라에서는 여름철에 호우사상을 중심으로 강수량이 증가하고 있기 때문이다(Choi *et al.*, 2008). 서울시의 경우에도 연평균 강수량이 1,330mm로 다우지에 속하는 지역이며, 지난 100년 동안에는

268.7mm/100년의 비율로 증가하는 추세(95% 유의수준)를 보였다. 특히 열파가 자주 발생하는 여름철 8월 강수량이 지난 100년간 통계적 유의성을 나타내면서 163.1mm/100년의 증가경향을 보였다(Figure 3b). 강수가 발생하는 경우에는 평균기온이 올라갈 수 없고, 평균기온이 상승하지 않으면 일반적으로는 기온 극값의 발생빈도도 높지 않기 때문에 열파 발생빈도의 변화도 뚜렷하지 않게 된 것이다. 이와 같이 강수증가에 의해 여름철 7~8월의 월 평균기온과 열파 발생빈도의 변화가 뚜렷하지 않은 것은 서울뿐만 아니라 한반도에 보편적으로 나타나는 기후변화 경향이다(Choi, 2006).

일차변화 추세는 뚜렷하지 않으나 여름철 기온평균 및 고온 극한현상의 하나인 열파일의 발생빈도의 경년 변동성은 유사하게 나타난다. 두 변수 간의 피어슨 상관계수(r)는 0.63으로 통계적으로도 유의하게 나타난다. 온실기체 증가에 의해 향후에 가시화될 여름철 기온상승에 따른 열파일 변화를 추정하기 위해, 지난 100년간의 여름철 평균기온 또는 누적 강수량과 모든 단계의 열파일 누적 발생빈도와의 회귀방정식을 산출하였다(Figure 4). 회귀식 산출시 널리 사용되는 최소자승법을 사용할 경우 y 변수의 오류만을 고려한다. 본 연구에서는 자료의 분산을 가장 잘 설명하고 회귀선의 수직방향 편차의 최소자승값을 산출하는 주성분 분석 제1고유벡터를 추출하여 사용하였다. 이 방법은 Figure 4에서와 같이 자료가 분산되어 있을 때 전체자료의 분산을 가장 잘 설명하는 추세선을 산출할 때 적합하다. 주성분 분석의 제1고유벡터로 추출된 선형회

귀에 따르면, 서울시의 경우 여름철 평균기온 증가에 따라 열파일도 뚜렷하게 증가하는 경향을 보인다(Figure 4a). 특히 기온이 23.4℃ 이상인 경우 평균기온의 상승에 따라 열파일은 8.8일/1℃일의 비율로 증가하는 추세를 보인다. 반면, 여름 총 강수량과 열파 발생빈도간의 음의 상관관계($r=-0.33$)가 나타나, 강수량이 감소하면 열파일 발생빈도는 증가하는 경향이 관찰된다(Figure 4b). 특히 500mm 이하의 강수량을 기록한 여름철에는 열파 발생빈도가 급증하는 경향이 관찰된다. 이러한 결과들을 종합하면 여름철(6~8월) 평균기온이 23℃ 이상 상승하거나, 누적 강수량이 500mm 이하로 감소하게 될 경우에는 열파일 발생빈도가 급증하게 될 것임을 예상할 수 있다.

4. 1994년 강한 열파 발생시 서울 도심내 열환경 및 사망자 발생 패턴

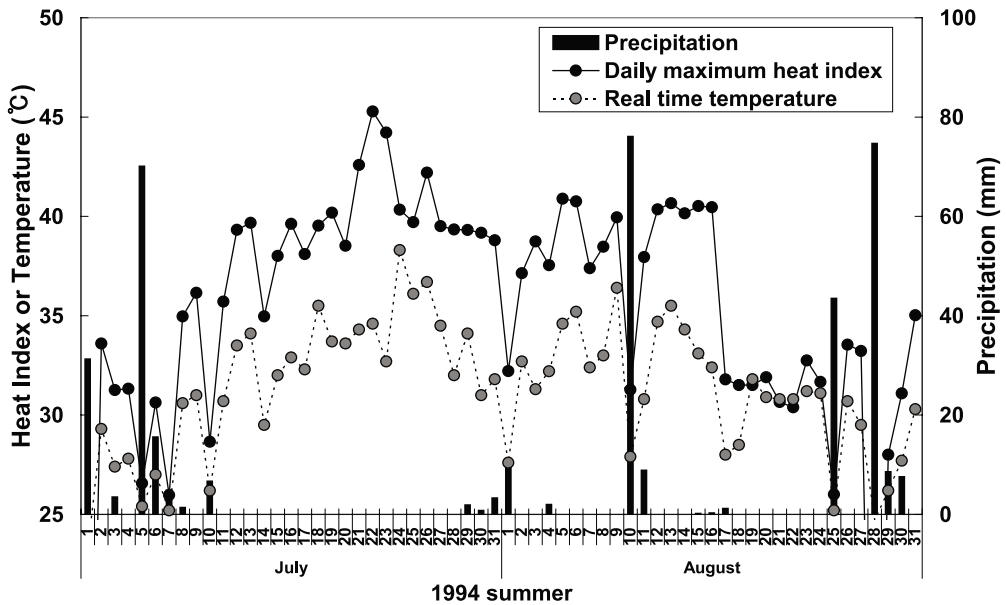
1) 시계열 패턴

100년간의 열파 발생일 시계열에서 1994년은 강한 열파가 자주 발생한 해임이 밝혀졌다. 여름철 7~8월의 열파 발생일을 요약하면(Table 2), 1994년의 경우 3일 동안 일최고 열지수가 35.5~38.5℃로 지속되는 열파일의 발생빈도는 100년 동안 평균(3.2회)에 비하여 약 4배 높은 12일을 기록하였다. 3일 동안 일최고 열지수

Table 2. A summary of 1994 summer (June-August) heat waves and elderly (65 years old or more) mortality in Seoul. 평년 대비 1994년 여름철(7~8월) 열파 발생과 노인(65세 이상) 사망자의 요약.

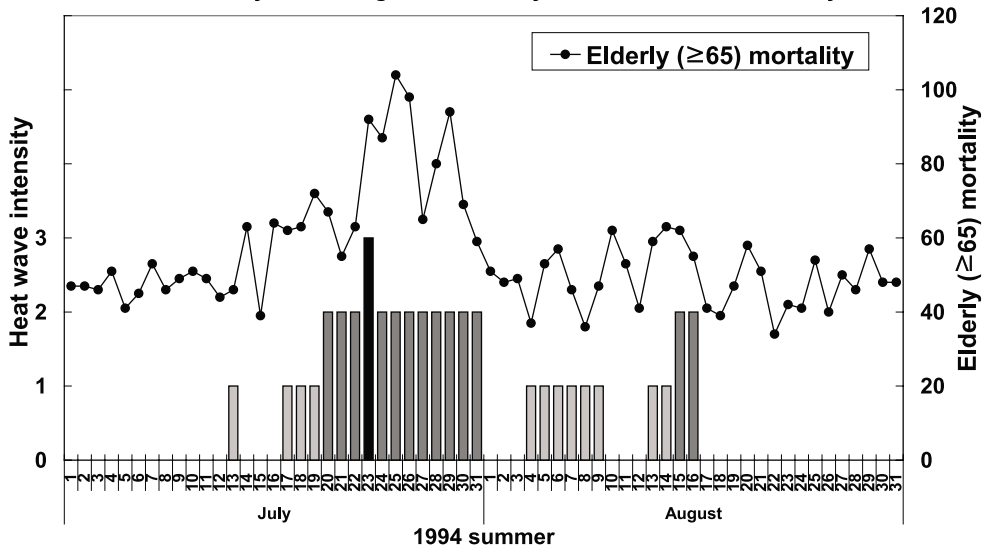
Seoul		Heat wave days	Strong heat wave days	Extreme heat wave days	Total precipitation (mm)	Disease-caused elderly mortality
1994	July	4	11	1	139.5	1911
	August	8	2	0	232.7	1515
	Summer (July-August)	12	13	1	372.2	3426
Summer average (1908-2007)		3.2	0.3	0	658.3	2681*
Summer surplus (times)		8.8 (3.9)	12.7 (43)	First and last record	-303.7 (0.57)	745 (1.3)

* This value is normalized based on the (July 1) elderly population in 1994



(a)

1: Heat wave days, 2: Strong heat wave days, 3: Extreme heat wave days



(b)

Figure 5. Intra-seasonal variations of daily precipitation, maximum heat index and real time air temperature (a) and daily heat wave intensity and elderly (≥ 65 years old) mortality (b) in 1994 summer (July-August) in Seoul. 1994년 7~8월 동안 서울의 일최고 열지수 및 실시간 기온의 변화(a)와 일별 열파 강도 및 노인(65세 이상) 질병사망자의 변화.

가 38.5~41.5℃을 보이는 강한 열파일의 발생빈도도 100년 평균(0.3회)에 비하여 43배에 해당하는 13일을 기록하였다. 특히, 1994년 7월 23일에는 과거에 전혀

발생한 전례가 없는 3일 동안 일최고 열지수가 41.5℃ 이상 지속되는 극심한 열파일도 발생하였다. 이러한 열파일 발생빈도가 높았던 이유는 1994년 서울의 여름

철(6~8월)의 경우 7월 초순부터 7월 말까지 마른장마가 지속되었기 때문이다(Figure 5a). 1994년 여름철 7~8월의 누적 강수량은 372.2mm로 100년 평균값(658.3mm)의 57% 정도밖에 되지 않았다. 이와 같이 1994년 여름철에는 마른장마가 지속되면서 평년에 비해 열파일이 자주 발생하였기 때문에 서울시 65세 이상의 노인 질병사망자 수도 평년에 비하여 뚜렷하게 증가하였다(Table 2). 1994년 7~8월 누적 노인 질병사망자 수는 평년(1991~2000년 평균기준)에 비하여 735명 초과(1.3배)하였다. 특히, 7월의 총 노인 질병사망자 수는 10년 평균값(1,353명)에 비하여 557명(1.4배) 초과하여 발생하였다.

1994년 7~8월 서울의 일최고 열지수의 실시간 기온의 시계열을 살펴보면(Figure 5a), 높은 기온뿐만 아니라 높은 습도도 열파 발생에 큰 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 1994년 7월 중순부터 8월 중순까지 일최고 열지수는 기온에 비하여 모두 4.4℃ 이상 높게 나타났다. 특히 7월 22일의 경우에는 무려 체감온도(45.3℃)가 공기의 온도(34.6℃)에 비해서 11.5℃ 정도 더 높게 나타났다. 즉, 동아시아 여름몬순 체계에서는 나타나는 수증기의 이류에 의한 다습한 환경도 고온상태가 강한 열파로 강화되는데 중요한 영향을 미치고 있음을 가리킨다.

열파발생 기록을 살펴보면, 1994년 7월 서울의 경우 중순부터 강수일이 거의 나타나지 않아 7월 23일을 기점으로 3일 동안 41.5℃ 이상 지속되는 극심한 열파일을 기록하였다(Figure 5b). 이에 따라 7월 23일부터 65세 이상의 노인 질병사망자가 초여름이나 늦여름에 비하여 약 2배 이상 증가하기 시작하였다. 특히 노인질병사망자는 7월 27일 강수가 발생하기 이전까지 지속적으로 증가하였는데, 7월 25일의 경우에는 104명으로 최대값을 기록하였다. 즉, 강한 열파는 발생 당일 뿐만 아니라 발생 이후 2~3일간 노인 질병사망자를 증가시키면서 지속적으로 그 영향을 미침을 알 수 있다.

2) 공간패턴

강한 열파 발생시 도시 내부와 외곽의 열환경의 차이를 살펴보기 위하여 1994년 7~8월 도심(서울과 여

의도)과 도시외곽(고양과 사능) 자동기상관측지점에서 관측한 기온을 상호 비교하였다(Figure 6). 일 최고기온의 경우 열파일이 시작된 7월 중순~하순에는 도심과 도시외곽 모두 33℃ 이상으로 그 차이가 뚜렷하지 않았다(Figure 6a). 지난 100년간 가장 극심한 열파일로 기록된 1994년 7월 23일의 경우도 도심내 두 관측지점의 일 최고기온은 38.3~38.7℃이었고, 이로부터 20km 이상 떨어진 도시외곽의 기온도 이와 거의 유사하게 나타났다. 이 값들은 서울 정규관측지점의 일최고 열지수 발생시각의 기온값과 유사하다. 각 자동기상관측 지점의 상대습도 자료가 존재하지 않기 때문에 체감온도 값은 정확하게 알 수 없으나, 도심 및 도시외곽 지역 모두 강한 열파가 발생했음을 알 수 있다. 이러한 결과들은 여름철 주간의 열파는 도심 내 국지규모에서 발생하는 현상이라기 보다는 지역규모 이상의 현상임을 가리킨다.

일 최고기온의 경우와는 대조적으로 강한 열파 발생시 도심과 도시외곽의 일 최저기온은 뚜렷한 차이를 나타낸다(Figure 6b). 1994년 7월 발생한 열파일에는 도심 내부의 일 최저기온이 최소 25℃ 이상으로, 도시외곽의 값에 비하여 1.5~4.2℃ 더 높게 나타났다. 즉, 도심의 경우에는 열파 발생일에 야간에도 수면을 방해하는 열대야가 발생하여 주야간 모두 인체의 체온조절에 열악한 열환경이 조성됨을 알 수 있다. 특히 극심한 열파일의 다음날인 7월 24일 새벽의 경우에는 도심의 일 최저기온이 도시외곽에 비하여 4.2℃까지 더 높게 나타났다. 야간에 도시에서는 콘크리트나 아스팔트 피복이 주간 동안 흡수한 열이 지속적으로 방출되어 복사냉각이 둔화된다. 따라서 도심내부의 기온은 외곽에 비하여 야간에 서서히 떨어지고 체감온도도 높은 상태로 유지 될 수 있다. 그러나 실제 일최저 열지수와 사망자 발생 시계열을 비교해 보면 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않는다(미제시). 이것은 일최고 체감온도가 일차적으로 열파 발생시 중요한 요소이고, 일최저 체감온도는 그 지속기간에 영향을 미치는 부가적인 요소임을 가리킨다.

강한 열파 발생시 도심내 열환경의 공간 분포패턴을 보다 상세하게 살펴보기 위하여 1994년 7월 26일 서울시에서 강한 열파 발생시 촬영된 Landsat TM 영상에

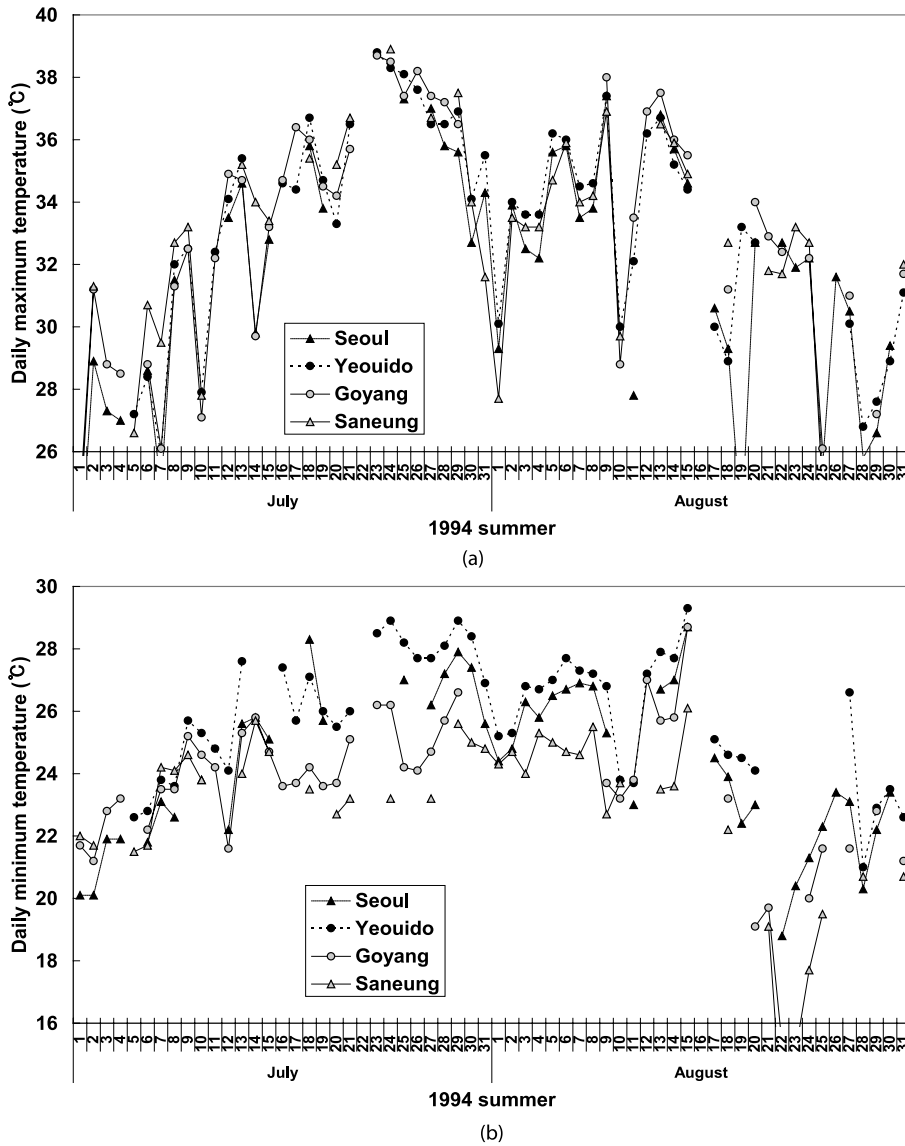


Figure 6. Comparisons of 1994 summer (July-August) daily maximum (a) and minimum (b) temperatures between urbanized areas (black symbols with dotted lines; Seoul and Yeouido) in Seoul and rural areas (gray symbols with solid lines; Goyang and Saneung) in the surroundings. See Figure 1 for locations of these Automatic Weather Stations (AWS). 서울 도심 내부(검은색 도형과 파선; 서울과 여의도)와 외곽(회색 도형과 실선; 고양과 사능)의 1994년 여름철 (7~8월) 일 최고 및 일 최저 기온의 비교.

서 지표기온을 추출하였다(Figure 7a). 7월 26일 오전 10시 30분 경 서울 대부분의 도심 내부에서는 이미 28℃ 이상의 고온상태를 보인다. 서울 전체 공간평균 지표온도는 27.8℃이지만, 최고온도는 37.7℃, 최저온도

는 21.7℃로 공간편차가 크게 나타난다(Table 3). 서울시 각 구별 공간평균 지표온도를 순서대로 정리하여 보면 영등포구, 동대문구, 성동구, 중구의 경우에는 모두 29℃ 이상을 나타낸다. 특히 한강 이북의 동대문구,

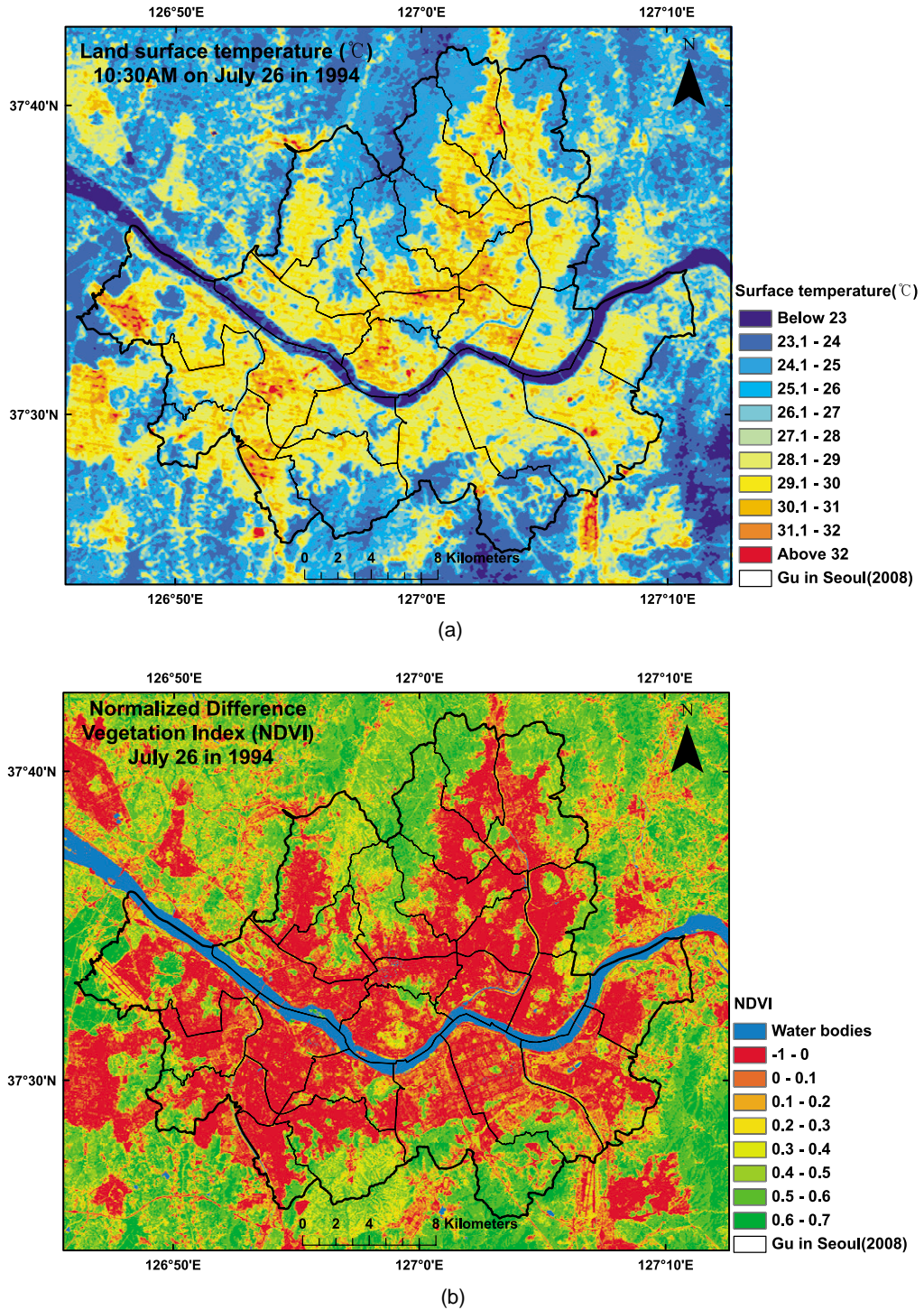


Figure 7. Spatial patterns of land surface temperature (a) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (b) in Seoul and in the surroundings that are extracted from Landsat TM imagery taken on July 26 in 1994. 1994년 7월 26일 Landsat TM 위성영상에서 추출한 서울과 인근 지역의 지표온도(a)과 정규식생지수(b)의 공간 분포패턴.

Table 3. A summary of spatial average (Mean), maximum (Max), minimum (Min) land surface temperatures and the average Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) by district (Gu in 2008) in Seoul extracted from Landsat TM imagery (on July 26 in 1994). The sorting order of data is based on mean land surface temperature. SD denotes standard deviation. Landsat TM 위성영상(1994년 7월 26일)에서 추출한 서울시 각 구별 (2008년 기준) 공간 평균, 최고, 최저 온도와 공간 평균 정규식생지수.

District (Gu)	Skin temperature (°C)				NDVI	District (Gu)	Skin temperature (°C)				NDVI
	Mean	Max	Min	SD			Mean	Max	Min	SD	
Yeongdeungpo	29.55	35.39	22.15	1.28	-0.04	Gangseo	27.82	33.41	22.58	2.51	0.17
Dongdaemun	29.36	33.01	23.88	1.47	-0.01	Gangnam	27.81	33.41	23.02	1.82	0.12
Seongdong	29.30	32.61	23.45	1.42	-0.03	Seodaemun	27.77	31.40	23.02	1.91	0.14
Jung	29.23	34.60	23.88	1.80	0.02	Jungnang	27.55	32.21	22.58	2.08	0.11
Yongsan	28.99	36.18	22.58	1.79	0.06	Gangdong	27.36	30.99	22.15	1.76	0.13
Mapo	28.72	32.61	22.58	1.50	0.04	Dobong	27.24	34.60	23.02	2.48	0.25
Yangcheon	28.44	32.61	23.45	1.67	0.07	Jongno	27.19	32.61	22.58	2.34	0.23
Songpa	28.43	37.74	21.71	1.44	0.08	Nowon	27.04	34.60	23.02	2.30	0.23
Guro	28.32	33.81	23.02	2.09	0.10	Eunpyeong	26.77	32.61	21.71	2.14	0.23
Geumcheon	28.25	34.21	23.02	2.53	0.09	Gangbuk	26.74	32.21	23.02	2.49	0.29
Dongjak	28.22	31.80	23.02	1.58	0.08	Gwanak	26.62	31.40	22.58	2.19	0.22
Seongbuk	28.10	32.61	23.45	2.30	0.15	Seocho	26.61	33.81	22.58	2.42	0.27
Gwangjin	27.82	31.80	23.02	1.69	0.07	Seoul	27.76	37.74	21.71	2.23	0.14

Table 4. Same as Table 3, but for in the surroundings of Seoul. 서울 주변 외곽지역의 공간 평균, 최고, 최저 온도와 정규식생지수(나머지 세부 사항은 Table 3과 동일).

Town (Si)	Skin temperature (°C)				NDVI
	MEAN	MAX	MIN	STD	
Namyangju	24.08	31.80	20.83	1.48	0.51
Kimpo	24.64	30.58	22.15	1.20	0.47
Hanam	24.78	31.40	21.27	1.95	0.43
Yangju	24.81	33.01	21.71	1.37	0.47
Goyang-Duckyang	25.45	35.39	22.15	1.83	0.38
Gwacheon	25.55	32.61	21.71	2.03	0.40
Gwangmyung	26.34	36.57	22.58	2.13	0.33
Surroundings	25.09	36.57	20.83	1.71	0.43

성동구, 중구, 종로구 접경 지역, 마포구와 용산구 접경지역, 그리고 영등포 지역에서는 지표가 31℃ 이상의 고온상태를 보인다. 일부 강서구 지역에서도 김포 공항을 중심으로 고온지역이 나타난다. 이외에 용산구, 마포구, 양천구, 송파구, 구로구, 금천구, 동작구, 성북구 등도 공간평균 지표온도가 28℃ 이상을 보인다. 반면, 서초구, 관악구, 강북구, 은평구 등은 27℃

이하로 상대적으로 낮게 나타난다. 대부분 지역이 초지나 산림으로 피복된 서울 외곽지역의 경우에는 공간평균 지표온도(25.1℃)가 서울 도심평균 지표온도(27.8℃)에 비하여 약 2.7℃ 낮다(Table 4). 또한 표준편차 값을 비교하여 보면 지표온도의 공간편차도 도심(2.2)에 비하여 도시 외곽지역(1.7)에서 상대적으로 작게 나타난다. 서울 외곽지역 중 특히 대부분의 지역이 산림

이나 초지로 피복된 남양주시의 경우 평균 지표온도가 24.1℃로 가장 낮고, 최고 지표온도(31.8℃)와 최저 지표온도(20.8℃)도 다른 지역보다 더 낮다.

Landsat TM 가시광선과 근적외선을 이용하여 추출한 정규식생지수(NDVI)의 분포도를 살펴보면, 서울 도심의 지표온도는 아스팔트나 콘크리트로 덮인 도시 피복과 산림피복 면적의 상대적인 비율과 관련성이 있음을 알 수 있다(Figure 7b). 1994년 7월 26일 서울의 공간평균 NDVI는 0.14이지만, 대부분 아스팔트 콘크리트로 피복된 도심 내부에서는 공간평균 NDVI 값이 0.05 이하이다(Table 3). 특히 도시피복이 연속적인 영등포구, 동대문구, 성동구는 공간평균 NDVI가 음의 값을 나타내기도 한다. 대조적으로 주변에 산림지역이 있는 강북구, 서초구, 도봉구 등은 공간평균 NDVI 값은 모두 0.25 이상으로 2배 이상 높게 나타난다. 특히 강북구 지역에서는 주변 산악지역에 식생피복이 상대적으로 많아 공간평균 NDVI가 0.29로 서울시 전체 구에서 가장 높게 나타난다. 도심내에서 산림피복지역은

도시화에 의한 기온상승률을 저감시키는 도시냉섬의 역할을 한다. 북한산에 인접하여 도봉구, 강북구, 성북구, 종로구, 은평구 지역에서는 40% 이상의 지역이 산림으로 피복되어 NDVI 최대값의 범위도 0.5~0.7로 매우 높게 나타난다(Figure 7b). 지표온도의 경우 NDVI가 높은 산림지역들을 중심으로 25℃ 이하의 저온 핵들이 형성된다. 유사하게 한강이남 지역의 관악구, 서초구의 NDVI값이 0.5 이상인 산림 피복지역에서도 지표온도가 25℃ 이하를 나타낸다. 도시 내부에서도 산림으로 피복된 남산의 경우에도 지표온도가 23~25℃로, 주변 도시화된 지역에 비하여 3℃ 이상 낮게 나타난다. 서울 도심 외곽지역의 평균 NDVI는 0.43으로 서울 도심의 평균 값(0.14)보다 3배 이상 더 높게 나타난다. 특히 도시외곽에서도 공간평균 지표온도가 가장 낮게 나타나는 남양주시의 경우 NDVI 평균값은 0.51로 가장 높게 나타난다(Table 4).

서울 도심내 중랑천, 안양천, 양재천 등의 지류하천을 따라서도 25~26℃의 낮은 지표온도가 나타난다.

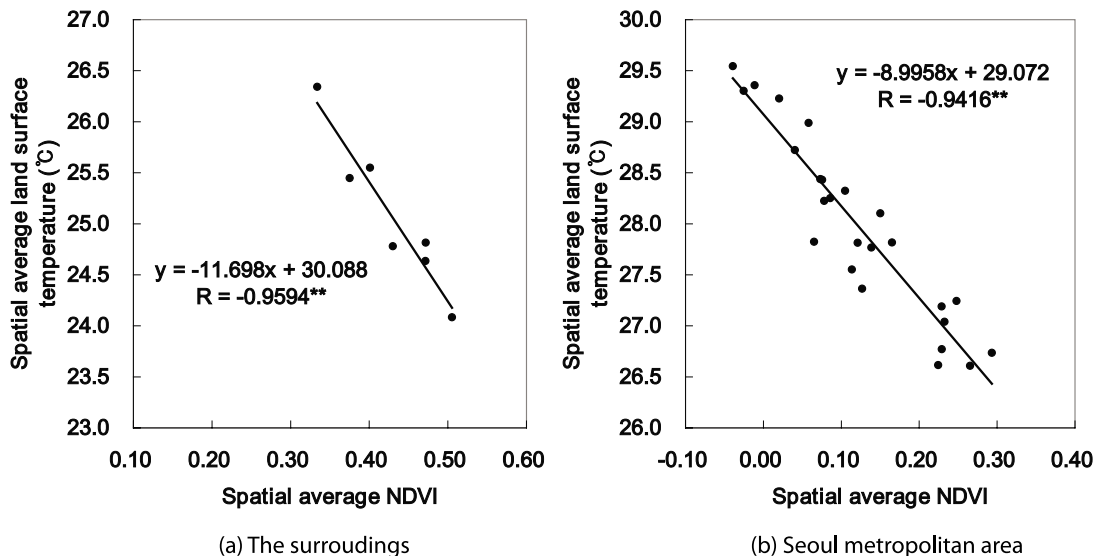


Figure 8. Associations between spatial average Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and land surface temperature derived from Landsat TM imagery (on July 26 in 1994) across the less urbanized areas in the outskirts (a) and across districts (Gus) within the Seoul metropolitan area (b). **: significant at the 99% level. Landsat TM 위성영상(1994년 7월 26일)에서 추출한 서울 도심내 각 구별(a) 또는 서울 외곽 도시화가 덜 된 지역(b)의 공간 평균 정규식생지수와 지표온도 간의 관련성.

그러나 지류하천의 경우 바로 인접한 주변지역과는 급격한 온도경도를 보인다. 가령, 성동구의 경우에는 지류하천과 그 주변의 지표온도 차가 10℃에 이르기도 한다. 한강을 따라서는 이보다 훨씬 더 낮은 23℃ 이하의 지표온도를 나타낸다. 하천 수면에서 형성된 냉기류의 경우에는 상대적으로 무거워서 주변 제방을 넘어 가열된 도시지역으로 흐르기가 어렵다. 반면, 해발고도가 상대적으로 높은 산림지역에서 형성되는 냉기류의 경우에는 중력의 영향을 받아 사면을 따라 도심내부로 이동하는 것이 가능하다. 따라서 이러한 거리에 따른 온도경도가 산림과 수체 간에도 달라지게 된다.

대도심 내부와 외곽의 녹지피복의 면적과 활력도가 높아질수록 지표온도 상승은 더욱 둔화된다(Figure 8). 서울 도시외곽의 산림피복이 50% 이상인 행정구역의 정규식생지수의 공간평균값을 살펴보면 0.35~0.50의 범위를 보이는데, 정규식생지수가 0.1 증가하면 지표온도는 1.2℃씩 낮아진다(Figure 8a). 반면 서울 도심내 각 구별 공간평균 정규식생지수는 도시외곽에 비하여 매우 낮은 -0.10~0.30의 범위를 이룬다. 그러나 서울 도심내에서도 공간평균 식생지수가 증가하면 지표온도가 하강하는 패턴이 뚜렷하게 나타난다(Figure 8b). 도심 내에서 정규식생지수가 0.1 증가하면 지표

온도는 약 0.9℃ 정도 하강한다. 즉, 도심내부의 식생지수증가에 따른 지표기온의 민감도도 도시외곽의 민감도와 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과들은 도심내의 산림이나 초지피복이 도시 열환경을 조절하는데 큰 역할을 하고 있음을 잘 보여준다.

강한 열파 발생시 도심내 열환경 분포는 도시 거주자의 건강에 큰 영향을 미친다. 1994년 7월 서울시 각 구별 65세 이상 노인 질병사망자 수의 공간통계를 분석해 보면, 지표온도가 고온역을 보이는 지역에서 상대적으로 더 높은 사망자 수를 보인다(Table 5). 가령, 성동구, 서초구, 중랑구, 마포구, 용산구, 양천구, 동대문구 등이 노인 2만 명당 90명 이상의 질병사망자를 나타냈다. 이중 성동구, 마포구, 용산구, 양천구, 동대문구는 Landsat TM에서 추출한 지표온도가 높은 지역에 속한다. 반면 서초구와 중랑구는 상대적으로 높은 공간평균 식생피복 지역에 속함에도 불구하고 사망자 수가 높게 나타났다. 이것은 각 구별로 평균한 값으로 실제 주거지의 열환경을 정확하게 반영하는 것은 아니기 때문에 산지지역을 배제한 추후 세부분석이 요구된다. 또한 열파에 발생시에는 고온의 열환경 이외에도 사회환경적 요인들이 그 패턴을 변형시킬 수 있다. 예를 들면 각 행정구역 별 사회경제 계층구조, 냉방장치

Table 5. 1994 July elderly (65 years old or more) mortality by district (Gu) in Seoul. Normalized mortality is calculated based on the average of elderly populations across districts (Gus) (per 20,000 elderly persons). 서울시 각 구별 1994년 7월 총 노인(65세 이상) 질병사망자 (2만명 노인인구 기준 표준화).

District (Gu)	Elderly mortality	Elderly population	Normalized mortality*	District (Gu)	Elderly mortality	Elderly population	Normalized mortality*
Seongdong	155	29570	105	Gwanak	88	21075	84
Seocho	91	17742	103	Gangseo	87	20872	83
Jungnang	80	16539	97	Gangdong	84	20681	81
Mapo	94	19781	95	Guro	95	23588	81
Yangcheon	88	18702	94	Seongbuk	94	23926	79
Yeongdungpo	79	16985	93	Dongjak	73	18867	77
Dongdaemun	89	19615	91	Yongsan	54	14860	73
Eunpyeong	95	21674	88	Nowon	94	25897	73
Jung	39	8913	88	Seodaemun	64	17825	72
Dobong	137	31989	86	Songpa	86	26478	65
Gangnam	104	24667	84	Jongno	41	12716	64

Notes: * The sorting order of data is based on the normalized mortality.

보급 정도, 도시 슬럼의 공간집중도 등이 관련되어 있을 것으로 추정되므로 사회경제적 자료에 대한 추후분석도 요구된다. 한편, 종로구와 송파구에서는 노인 2만 명당 65명 이하로 노인 질병사망자수가 낮게 나타났다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 지상관측 기상자료, 위성영상 추출 지표 온도 및 식생지수 자료, 사망자 자료 등을 종합하여 지난 100년(1908~2007)간 서울시에서 발생한 열파의 변화 추세와 강한 열파 발생시 도심내부의 열환경이 사망자에 미치는 영향을 평가하였다. 주요한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 연평균 기온상승 경향에도 불구하고 여름철 강수증가에 따라 지난 100년 동안 서울시의 평균기온 및 열파 발생빈도는 뚜렷한 변화경향을 보이지 않는다. 경년변동성을 고려하면 여름철 평균기온이 1℃ 상승 시 열파일(3일 동안 일최고 열지수가 35.5℃ 이상 지속된 경우)의 발생빈도는 8.8일 증가하는 민감도를 보인다.

둘째, 지난 100년간 전체기간 중 1994년 7월은 마른장마가 장기간 지속되면서 강한 열파(3일 동안 일최고 열지수가 38.5℃ 이상 지속된 경우) 발생빈도가 높았던 시기로, 7월 23일에는 심지어 전례없이 극심한 열파일(3일 동안 일최고 열지수가 41.5℃ 이상 지속된 경우)도 발생하였다. 그 결과, 1994년 여름철(7~8월) 65세 이상 노인 질병사망자는 평년에 비하여 30% 이상 증가하였다.

셋째, 식생지수 공간평균 값이 0.1 이하의 도심 내부 지역-영등포구, 동대문구, 성동구, 중구 등-에서는 공간평균 지표온도가 도시외곽에 비하여 4℃ 이상 높게 나타났다. 위성영상에서 추출한 정규식생지수가 0.1 증가하면 도심내부에서는 지표온도가 0.9℃ 하강하고, 도시외곽에서는 1.2℃ 하강하는 변화율을 나타낸다.

넷째, 성동구, 마포구, 용산구, 양천구, 동대문구에

서는 열파 발생에 의해서 지표온도가 상승하여 고온핵들이 형성되면서 노인 질병사망자가 다른 구에 비하여 더 증가하였다. 반면, 서초구의 경우에는 공간평균 식생지수가 높게 나타남에도 불구하고 사망자가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 노인 사망자의 경우에는 열파 발생시 고온형성이라는 열환경 요소 이외에도 다양한 사회경제적인 요인들이 영향을 미치고 있기 때문에 상세한 후속 연구가 필요함을 보여준다.

본 연구는 강한 열파 발생시 서울 도심내부의 열환경이 녹지피복 보호에 의해 저감될 수 있고 결국 노인 사망자를 저감시킬 수 있다는 것을 잘 보여주고 있다. 1960년대 이후 서울은 전세계적으로 가장 비대한 인구집중 현상으로 좁은 지역에 열을 잘 흡수할 수 있는 피복들이 과대하게 증가하였다. 생리기후환경은 눈에 잘 보이지 않지만 결국 인간의 건강에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이다. 지난 몇 십 년 동안 경제논리에 의해 진행된 무질서한 도시 공간개발은 장기간 안목에서는 결국 그 지역에 거주하는 인간의 건강에 악영향을 초래하고 있다. 특히 미래에 기후변화에 의해 온난화가 가속화 되면 도심내에서는 강한 열파가 더욱 자주 발생하여 더 많은 인명피해를 초래하게 될 것이다. 따라서 현존하는 그린벨트를 최대한 보호하도록 법제화하고, 차후 도심재개발 시에는 보다 많은 녹지들이 도심 내에 조성될 수 있도록 국가적 차원의 도시열환경 보존을 위한 녹색정책을 마련하는 것이 시급하게 요구된다.

사사

본 연구에 사용된 기상 자료, 사망자 자료, 위성영상 자료를 제공한 우리나라 기상청, 통계청, 미국지질조사국(USGS)에 진심으로 감사 드린다.

참고문헌

- Boo, K. O., Chun, Y. S., Park, J. Y., Cho, H. M., and Kwon, W. T., 1999, The horizontal distribution of air temperature in Seoul using automatic

- weather station data, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 35, 335-343 (in Korean).
- Chander, G. and Markham, B. L., 2003, Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 41, 2674-2677.
- Chander, G., Markham, B. L., and Helder, D. L., 2009, Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environments*, 113, 893-903.
- Changnon, S. A., Kunkel, K. E., and Reinke, B. C., 1996, Impacts and responses to the 1995 heat wave: A call to action, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1497-1506.
- Choi, G., 2006, A definition of Korean heat waves and their spatio-temporal patterns, *Journal of the Korean Geographical Society*, 41, 527-544.
- Choi, G., Choi, J., and Kwon, H. J., 2005, The impact of high apparent temperature on the increase of summertime disease-related mortality in Seoul, 1991-2000, *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 38, 283-290 (in Korean).
- Choi, G., Choi, J., Kim, J. W., and Son, S. W., 2002, The climatology of perceived sultriness in South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 37, 385-402 (in Korean).
- Choi, G., Kwon, W. T., Boo, K. O., and Cha, Y. M., 2008, Recent spatial and temporal changes in means and extreme events of temperature and precipitation across the Republic of Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 43, 681-700.
- Houghton, F. C. and Yagloglou, C. P., 1923, Determining equal comfort lines, *Journal of the American Society Heating and Ventilation Engineers*, 29, 165-176.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 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.
- Kim, J., Lee, D. G., Choi, B. C., and Park, I. S., 2007, Synoptic air mass classification using cluster analysis and relation to daily mortality in Seoul, South Korea, *Atmosphere*, 17, 45-53 (in Korean).
- Kim, J., Lee, D. G., and Kysely, J., 2008, A synoptic and climatological comparison of record-breaking heat waves in Korea and Europe, *Atmosphere*, 18, 355-365 (in Korean).
- Kim, J., Lee, D. G., Park, I. S., Choi, B. C., and Kim, J. S., 2006, Influences of heat waves on daily mortality in South Korea, *Atmosphere*, 16, 269-278 (in Korean).
- Kim, J., Lee, D. G., and Kysely, J., 2009, Characteristics of heat acclimatization for major Korean cities, *Atmosphere*, 19, 309-318 (in Korean).
- Kim, J. and Lee, S., 2007, The distribution of heat waves and its cause in South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 42, 332-343 (in Korean).
- Kim, Y. H. and Baik, J. J., 2002, Maximum urban heat island intensity in Seoul, *Journal of Applied Meteorology*, 41, 651-659.
- Kwon, Y. A., 2006, Analysis of urban thermal environment properties using Landsat ETM+ in Seoul, *Journal of the Korean Urban Geography Society*, 9, 147-157 (in Korean).
- Kysely, J., Huth, R., and Kim, J., 2010, Evaluating heat-related mortality in Korea by objective classification of air masses, *International Journal of Climatology*, 30, 1484-1501.
- Kysely, J. and Kim, J., 2009, Mortality during heat waves in South Korea, 1991-2005: How exceptional was the 1994 heat wave?, *Climate Research*, 38, 105-116.
- Lee, D. G., Kim, J., and Choi, B. C., 2007, Characteristics of daily mortality due to heat waves in Busan in

- July 1994, *Atmosphere*, 17, 463-470 (in Korean).
- Lee, H. Y., 1993, An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat islands, *Atmospheric Environment*, 27B, 1-13.
- Park, H. S., 1986, Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities, *Atmospheric Environment*, 20, 1859-1866.
- Park, J. K., Jung, W. S., and Kim, E. B., 2008a, A study on development of the extreme heat standard in Korea, *Journal of the Environmental Sciences*, 17, 657-669 (in Korean).
- Park, J. K., Jung, W. S., and Kim, E. B., 2008b, A study on the influence of extreme heat on daily mortality, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24, 523-537 (in Korean).
- Park, J. K., Jung, W. S., and 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, 767-780 (in Korean).
- Rothfus, L. P., 1990, *The Heat Index equation (or, more than you ever wanted to know about Heat Index)*, Forth Worth, Texas: NOAA, NWS, OM, Publication no SR 90-23.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., and Deering, D. W., 1974, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *Proceedings of the 3rd ERTS Symposium*, 1, 48-62.
- Sheridan, S. C. and Kalkstein, L. S., 2004, Progress in heat wave-warning system technology, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85, 1931-1941.
- Smoyer, K. E., 1998, A comparative analysis of heat waves and associated mortality in St. Louis, Missouri-1980 and 1995, *International Journal of Biometeorology*, 42, 44-50.
- Stott, P., Stone, D., and Allen, M., 2004, Human contribution to the European heat wave of 2003, *Nature*, 432, 610-614.
- Thom, E. C., 1959, The discomfort index, *Weatherwise*, 12, 57-60.
- Tromp, S. W., 1980, *Biometeorology: The Impact of The Weather and Climate on Humans and Their Environment (Animals and Plants)*, Heyden, London.
- UNEP (United Nations Environmental Programme), 2004, Impacts of summer 2003 heat wave in Europe, *Environment Alert Bulletin*, 2, 1-3.
- <http://www.kma.go.kr>
- <http://kostat.go.kr/>
- Kyongbukilbo, August 6, 2010 (available at <http://www.kyongbuk.co.kr/>).
- 교신: 최광용, 200-701, 강원도 춘천시 효자동 강원대학교 환경과학과 환경원격탐사연구실(이메일: tribute@hanmail.net, 전화: 033-250-7318)
- Correspondence: Gwangyong Choi, Environmental Remote Sensing Laboratory, Department of Environmental Science, Kangwon National University, Hyoja-dong, Chuncheon, Gangwon-do, 200-701, Republic of Korea, e-mail: tribute@hanmail.net, phone: +82-33-250-7318
- 최초투고일 2010. 10. 6
수정일 2010. 10. 22
최종접수일 2010. 10. 23