



서울시 폭염 취약지역의 공간적 패턴 및 적응능력 취약지역 분석*

An Analysis on the Spatial Patterns of Heat Wave Vulnerable Areas and Adaptive Capacity Vulnerable Areas in Seoul

최예술** · 김재원*** · 임업****
Choi, Ye Seul · Kim, Jae Won · Lim, Up

Abstract

With more than 10 million inhabitants, in particular, Seoul, the capital of Korea, has already experienced a number of severe heat wave. To alleviate the potential impacts of heat wave and the vulnerability to heat wave, policy-makers have generally considered the option of heat wave strategies containing adaptation elements. From the perspective of sustainable planning for adaptation to heat wave, the objective of this study is to identify the elements of vulnerability and assess heat wave-vulnerability at the dong level. This study also performs an exploratory investigation of the spatial pattern of vulnerable areas in Seoul to heat wave by applying exploratory spatial data analysis. Then this study attempts to select areas with the relatively highest and lowest level of adaptive capacity to heat wave based on an framework of climate change vulnerability assessment. In our analysis, the adaptive capacity is the relatively highest for Seongsan-2-dong in Mapo and the relatively lowest for Changsin-3-dong in Jongno. This study sheds additional light on the spatial patterns of heat wave-vulnerability and the relationship between adaptive capacity and heat wave.

키 워 드 ■ 기후변화, 폭염, 취약성 평가, 폭염 취약지역, 적응능력, 탐색적 공간자료분석

Keywords ■ Climate Change, Heat Wave, Vulnerability Assessment, Heat Wave Vulnerable Area, Adaptive Capacity, Exploratory Spatial Data Analysis

I. 서 론

1. 연구의 배경

폭염과 같이 기후변화(climate change)로 야기되는 극단적인 기후 현상은 단기적인 환경 변화뿐만

아니라 장기간에 걸쳐 인간의 건강이나 생태계에 심각한 영향을 미친다. 이러한 환경위험의 발생빈도 및 강도는 지속적으로 증가할 것으로 전망되고 있다. 최근 기후변화가 현 세대와 미래세대의 삶을 위협하는 주요 요인으로 논의되기 시작하면서 기후 변화에 대한 대응은 기후변화 완화(mitigation)와

* 이 논문은 2017년도 정부재원(과학기술정보통신부 여대학(원)생 공학연구팀제 지원사업)으로 과학기술정보통신부, 한국연구재단과 한국여성과학기술인지원센터의 지원을 받아 수행된 연구임. 이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2017R1D1A1B03035147).

** Department of Urban Planning and Engineering, Yonsei University

*** Department of Urban Planning and Engineering, Yonsei University

**** Department of Urban Planning and Engineering, Yonsei University (Corresponding author: uplim@yonsei.ac.kr)

기후변화 적응(adaptation)이라는 두 가지 측면에서 논의되어 왔다. 전자는 기후변화로 인한 환경위험에 대응하기 위하여 기후변화 현상의 원인을 경감시키고자 하는 대응이며, 후자는 가속화되고 있는 기후변화로 인한 영향에 사전적으로 대비하고자 하는 대응을 의미한다. 최근에는 탄소배출권 거래제, 온실가스 배출저감 등을 통한 기후변화 완화 정책만으로는 기후변화로 인한 부정적인 영향을 감소시키는 데에 한계가 있기 때문에, 변화하는 기후에 적응하는 능력을 강화하는 정책의 수립 및 이행이 매우 중요한 과제로 인식되고 있다(IPCC, 2007; Solomon et al., 2009; Heinrichs et al., 2013). 우리나라에서도 기후변화 현상에 대응하기 위해 2010년 「제1차 국가기후변화적응대책(2011~2015)」을 수립하고, 이를 수정·보완하여 2015년 「제2차 국가기후변화적응대책(2016~2020)」을 발표함으로써, 경제, 사회, 환경 등 각 부문별 대응책을 제시하고 기후변화 취약성을 평가하여 기후변화 취약계층 및 지역 관리를 강화하고자 하였다.

기상이변의 규모와 불확실성이 높아지면서 더욱 문제가 되는 것은 모든 계층이나 지역에 동일한 피해가 발생하는 것이 아니라 물리적·사회적·환경적 불평등 간의 상호작용으로 인해 환경약자 특히, 기후변화 취약계층에 피해가 집중된다는 것이다(고재경 외, 2013; 박정규 외, 2013). 여러 선행연구들과 보고서들은 열악한 환경조건에 더하여 기후변화에 대한 사회경제적 대응력이 부족하여 피해가 가중될 수 있는 집단을 기후변화 취약계층으로 간주하고 있으며, 이에는 노인 및 영유아, 만성질환자 및 야외근로자, 사회경제적 지위가 낮은 집단이 포함된다(이나영 외, 2014; 임숙향·곽진, 2014). 실제로 2014년 질병관리본부의 「폭염 대비 온열질환 감시체계 및 건강수칙 안내」에 따르면, 주로 고령자와 독거노인, 야외근로자, 만성질환자에게서 온열질환 발생률이 높게 나타났다.

최근 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, 이하 IPCC)는 기후변화로 인한 환경위험 중에서 폭염에 주목하고 있다. IPCC의 RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오에 따르면 향후 100년간 지구의 평균온도는 약 2.8℃ 증가하고, 우리나라의 경우 이를 상회하는 약 4℃가 상승할 것으로 예측하고 있다. 실제로 서울시는 고밀도의 도시화로 인한 도시열섬 현상 등으로 인해 연평균 기온의 상승, 폭염일수 증가, 온열질환자 발생 증가 등과 관련된 이상고온 현상을 경험하고 있다. 기상청의 기상자료개방포털에 따르면, 지난 10년간 서울시의 폭염일수는 2016년이 24일로 가장 많았으며, 최고온도 또한 2016년이 2012년에 이어 두 번째로 높은 36.6℃를 기록하였다. 이와 더불어 서울시의 최근 5년간 관찰된 온열질환자는 2016년에 170명으로 이전 2014년 39명, 2015년 50명에 비해 급증한 것으로 나타났다. 이와 같은 흐름에서 최근 IPCC를 비롯한 국내외 기후 관련 협의체 및 정부 기관들은 폭염과 같은 기후변화로 인한 기상이변에 대응하기 위하여 현 세대와 미래세대가 직면하게 될 기상이변에 의한 피해를 최소화할 수 있는 적응 전략 및 대책 수립의 시급함을 강조한다.

최근 많은 정책 입안가들은 기후변화로 인한 위협에 대응할 수 있는 기후변화 적응 전략의 중요성을 인지하고, 이를 정책 수립과정에서 적극 반영하기 시작했다(Adger, 2001; Grothmann and Patt, 2005; Smit and Wandel, 2006; Hayhoe et al., 2010; Kitiia and Dowling, 2010; Heinrichs et al., 2013; Aylett, 2015; Chu et al., 2017). 하지만 국내 폭염 연구들의 대부분은 여전히 취약성만을 평가하는데 그치고 있으며, 적응전략을 수립하려는 연구들은 적응능력 향상이 가장 필요한 지역 즉, 적응능력이 상대적으로 가장 낮은 지역이 아닌 기후변화 취약지역에 대하여 적응능력 향상 전략을

수립하고 있어 적응능력 향상이 가장 필요한 지역에는 정작 전략 수립이 제대로 이루어지고 있지 않다. 따라서 폭염 적응정책의 수립 및 추진에 선행하여 폭염 취약지역의 공간적 분포를 분석하고, 폭염 적응형 공간계획 수립에 앞서 적응능력이 상대적으로 취약한 지역을 파악하는 것이 무엇보다 시급한 과제로 대두되고 있다.

2. 연구의 목적

본 연구는 폭염에 주목하여 IPCC의 기후변화 취약성 평가 개념을 바탕으로 서울시 행정동에 대하여 폭염 취약지역을 도출하고, 폭염에 대한 적응능력이 상대적으로 낮은 행정동을 파악함으로써 향후 폭염 적응능력 향상을 위한 도시 계획적 방안을 모색하기 위한 기초연구를 실시하는데 목적이 있다. 구체적으로 기후변화에 대한 노출정도, 민감도, 적응능력 등의 기후변화 취약성 평가 기준에 따라 폭염 취약지역 통합평가모형을 구축하여 서울시 행정동별 폭염 취약성을 평가하고, 탐색적 공간자료분석(exploratory spatial data analysis)의 응용을 통해 서울시 내 폭염 취약지역의 공간적 패턴을 실증적으로 분석하고자 한다. 또한 기후변화 취약성 평가 기준 가운데 적응능력에 초점을 두고 적응능력 취약지역 즉, 기후노출과 민감도 수준은 높은 반면 적응능력은 타 행정동들에 비해 상대적으로 낮은 행정동을 파악하고 적응능력 우수지역과 비교 분석하는 것을 목표로 한다.

3. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 선행연구 검토를 통해 기후변화 취약성 관련 개념들을 정의하고, 기후노출(climate exposure), 민감도(sensitivity), 적응능력(adaptive capacity) 등 기후변화 취약성 평가요소별 변수를

조사 및 선별한다. 본 연구에서 선정된 변수들은 환경적·물리적·사회경제적 변수들을 포함하고 있어 기후변화 취약성 평가모형은 취약성이 가진 다차원적 특성을 반영한다. 본 연구에서는 2015년 기준 서울시 행정동 기준으로 통계자료를 구축하고 행정동 수준에서 자료 구득이 어려운 경우 구 단위로 취합하여 해당 구에 동일한 값을 적용하여 계산한다. 각 평가요소별 변수의 표준화(standardization) 및 취약성-탄력성 지표 모형(Vulnerability-Resilience Indicator model; VRI)을 응용한 가중치를 부여함으로써 폭염 취약성 지수 값을 산출한다.

이후 산출된 폭염 취약성 지수 값에 공간자료분석 프로그램 GeoDa를 활용한 탐색적 공간자료분석 기법을 적용하여 폭염 취약성의 공간적 효과(spatial effects)를 분석하고, Moran 산점도 및 LISA 군집지도를 통해 폭염 취약성의 공간적 연관 구조를 분석한다. 2015년의 기온, 폭염일수 등의 기상 자료는 IPCC의 기후변화시나리오 RCP 8.5를 반영하여 서울시 행정동 단위로 분석된 기상청의 「서울특별시 구별 기후변화 상세 분석보고서」 자료를 활용하였다.¹⁾ 본 연구는 현재 통계자료의 최소 공표 단위이자 폭염 적응형 공간계획이 보다 효과적으로 수립되고 이행될 수 있는 공간 단위로서 서울시 424개 행정동을 설정하였다(Figure 1).

II. 연구의 이론적 기반

1. 기후변화 취약성 관련 개념들 정의

취약성(vulnerability)은 식량 안보, 자연재해 및 빈곤, 전염병 분야 등의 연구에서 주로 논의되어왔던 개념이다. 하지만 최근의 기후변화의 규모와 속도는 유례를 찾아볼 수 없을 정도로 크고 빠른 탓

에 인간과 생태계가 직면한 위험은 더욱 커지고 있어 취약성은 기후변화 담론의 실효적인 출발점이라 볼 수 있다(김동현, 2013). 이에 따라 기후변화 연구 분야에서도 취약성 개념을 정의하려는 논의가 적극적으로 수행되어왔다. 대표적으로 IPCC(2007)에 따르면, 기후변화 취약성(climate change vulnerability)은 시스템이 기후변동(climate variability)이나 극한 기후(extremes)에 의해 발생한 피해에 민감한 정도 또는 대처할 수 없는 정도를 의미하기 때문에 기후변화 취약성은 시스템이 노출된 기후변화의 특성, 규모 및 속도와 함께 기후변화에 대한 민감도, 적응능력의 함수로 이해될

수 있다(식 1).

$$\text{기후변화 취약성} = a * \text{기후노출} + b * \text{민감도} - c * \text{적응능력} \quad \langle \text{식 1} \rangle$$

〈식 1〉에서 기후노출은 시스템이 기후와 관련된 자극에 노출되는 정도를, 민감도는 기후 관련 자극에 의하여 시스템이 영향을 받는 정도이며, 적응력은 시스템이 기후변동과 극한기후현상을 비롯하여 잠재적인 피해를 완화하며 이를 기회로 활용하거나 대처하는 정도를 의미한다(IPCC, 2007). 예컨대, 기후변화에 대한 노출과 민감도가 높은 경우, 해당 시스템의 적응능력이 낮으면 그 시스템의 기후변화 취약성은 낮다고 평가할 수 있으나, 해당

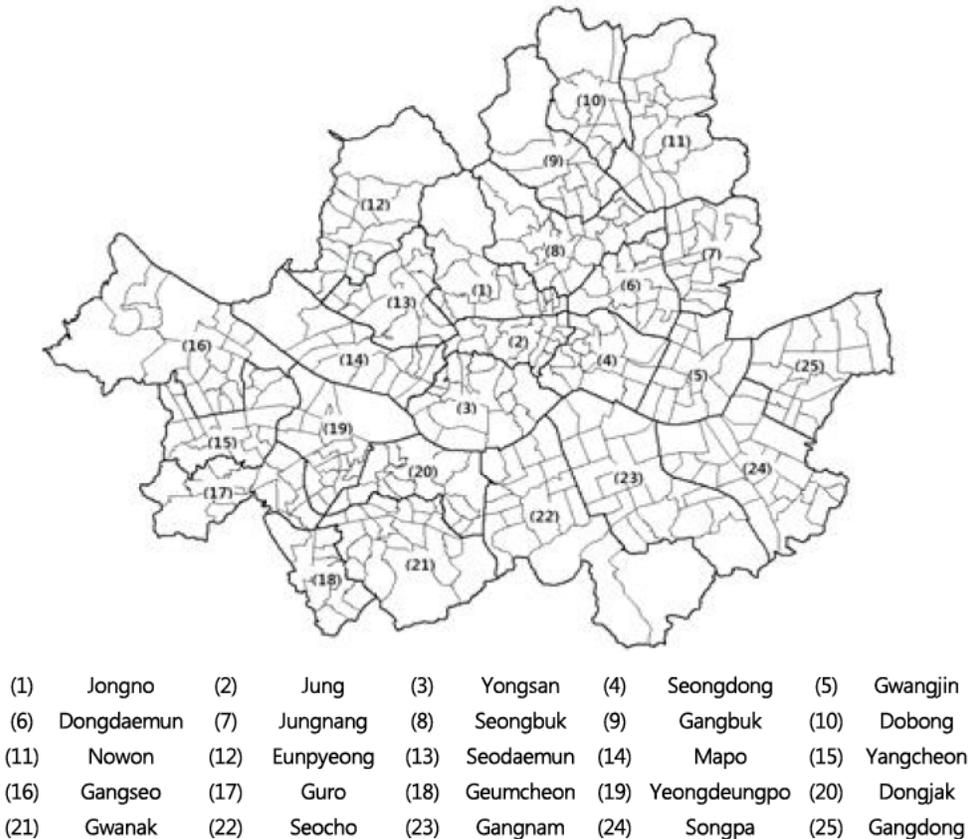


Figure 1. 424 dongs in 25 districts of Seoul metropolitan area in 2015

시스템의 적응능력 또한 높은 경우에는 그 시스템은 기후변화로 인한 잠재적 피해를 완화시키기 때문에 해당 시스템의 기후변화 취약성은 결코 낮다고 볼 수 없다(Lim et al., 2005).

기후변화로 인한 위협의 규모가 커지면서 최근 환경약자 또는 기후변화 취약계층에게 더 크고 빈번하게 피해가 발생하고 있다. 다시 말해 기후변화 취약성은 모든 계층에게 동일한 수준으로 나타나는 것이 아니며, 기후변화로 인한 피해는 이에 대응할 물리적, 사회적, 환경적 자원이 부족한 지역과 기후변화에 대처하고 회복하는 적응능력이 부족한 계층에게 더 크게 나타날 수 있다는 것이다(고재경 외, 2013; 박정규 외, 2013). 기후변화 취약계층의 개념은 연구자가 정의하는 기준에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 아동, 장애인, 노인 등의 생물학적 취약계층 외에도 저소득층, 이주민, 난민 등의 사회적으로 고립되고 열악한 사회경제적 취약계층까지도 포함하고 있다(박정규 외, 2013). 우리나라도 환경보건종합계획(2011~2020) 및 「환경보건법」 제 15조(환경 관련 건강피해의 역학조사 등)에서 어린이, 노인, 임산부, 야외 근로자, 저소득층 등을 기후변화 민감계층 또는 취약계층으로 분류하고 있다.

이러한 기후변화 취약계층은 건강상태나 기후변화, 기상이변 예보 등의 환경정보에 대한 접근성 부족, 환경오염 피해에 대비할 수 있는 사회경제적 능력이 부족하기 때문에 기후변화로 인한 피해에 더 취약하다고 볼 수 있다. 동일한 맥락에서 기후변화 취약지역은 기후변화에 지형적으로 취약하고, 인구구조, 재정구조, 의료시설 등의 사회경제적 기반이 빈약한 탓에 기후변화로 인한 피해에 대한 대응·복구능력이 부족한 지역을 지칭한다(신호성 외, 2010). 예컨대, 기후변화 취약지역은 급경사 지역, 공원 및 녹지 등에 대한 접근성이 떨어지는 등 지역의 지형적 특성 외에도 높은 인구밀도, 노후 상수도 시설 등 주거 환경이 열악하고, 기후변화에

대한 정보 접근이 어렵고, 아동, 노인, 이민자 등 이동성이 낮은 기후변화 취약계층이 다수 거주하는 지역을 의미하는 것으로 이해될 수 있다.

2. 기후변화 취약성 평가 및 기후변화 적응 정책 관련 연구동향

그 동안 기후변화의 영향 및 취약성을 평가하는 방법은 기존의 경험적인 자료를 바탕으로 수리적, 과학적인 모델링을 통해 전 지구 및 권역의 기후변화로 인한 노출 수준을 예측하고 미래 기후 시나리오를 적용하는 것이 주를 이루었다(김동현 외, 2013; 정휘철 외, 2012). 이러한 방법은 기후변화 적응을 위한 계획과 대책을 마련하는데 있어 과학적인 근거를 제공하는 중요한 역할을 하지만 궁극적으로는 기후변화 취약성 개념이 내포하고 있는 지역에 내재된 사회경제학적 특성들을 충분히 반영하지 못한 탓에 해당 지역에 보다 효과적으로 적용될 수 있는 기후변화 대응 계획과 정책을 수립하는데에 한계를 지닌다. 이러한 한계를 반영하여 최근의 연구들은 취약성에 영향을 미치는 요인으로 기후적인 특성 외에 추가적으로 지역의 특성, 거버넌스 등과 관련된 비기후적인 특성을 고려하고 있다는 점에서 보다 진전되었다고 볼 수 있다.

기후변화 취약성 평가의 발전단계가 초기에는 기후변화의 부정적 영향을 줄이기 위한 저감 및 적응 정책 등의 영향평가적 연구와 자원 배분의 우선순위를 정하기 위한 취약성 평가 연구 등에 머물렀다면 최근에는 이해당사자들의 참여를 통한 환경정의(environmental justice), 평등(equality) 등 규범적 측면에서의 기후변화 적응정책을 수립하는 흐름으로 변화하고 있다(Ikeme, 2003). 특히 최근의 흐름은 환경 위험에 상대적으로 더 큰 피해를 입을 가능성이 높은 집단들이 체감하는 환경 스트레스 및

위협에 대해 인종, 출신 국가 또는 소득에 관계없이 모든 사람들에 대한 공정한 대우와 함께 이들의 참여의 중요성을 강조하였으며(Bass, 1998; Ikeme, 2003), 이들이 겪는 불공평하고, 부당한 조건을 제거함으로써 환경 비용과 편익의 공정한 분배를 가로막는 부당함(injustice)을 제거하는데 주된 목적이 있다.

이러한 흐름에서 최근 급격히 증가하는 기후변화의 영향과 위협에 맞서 효과적인 기후변화 적응전략 수립을 위한 논의 또한 지속적으로 이루어지고 있다. 기후변화의 미래를 예측하는 것에 초점을 두었던 초기 연구들과 달리, 최근의 기후변화 연구들은 지역의 적응능력 향상을 통해 기후변화로 인한 피해를 감소시키는 방향으로 나아가고 있다(신호성 외, 2010; 구유성 외, 2015). 일반적으로 기후변화 적응이란 실제 혹은 예측되는 기후변화로 인한 위험을 최소화하고 기회를 최대화하는 기후변화 대응 방안을 의미하며, 기후변화 적응정책은 기후변화로 인한 영향의 감소를 목적으로 하는 공공에서 수립되는 행정지침으로 정의할 수 있다(명수정 외, 2012). 우리나라는 1992년 브라질 리우에서 체결된 기후변화 협약에 1993년부터 참여한 것을 시작으로 기후변화 대책 위원회를 구성하고 기후변화 협약 대응종합대책을 수립하고 시행함으로써 기후변화에 대응하려는 노력을 기울여 왔으나, 실질적으로는 제 3차 기후변화 협약 대응종합대책(2005~2007)에 이르러서야 기후변화 적응의 개념을 정책에 처음 반영하기 시작했다고 볼 수 있다(명수정 외, 2012; 이수재 외, 2013).

기후변화 적응정책 수립에 있어 최근 연구들이 주목하는 점은 기후변화로 인한 영향은 국가를 넘어 전 지구적인 수준에서 나타나지만, 이에 대응·적응하는 정책의 움직임은 오히려 로컬(local) 수준에서 빈번하게 일어나고 있다는 것이다. 다시 말해, 기후변화의 영향으로 발생할 수 있는 동일한 또는

유사한 규모의 영향일지라도 국가 하위 단위인 지역이 처한 여건에 따라 결과가 상이하게 나타날 수 있기 때문에(Bicknell et al., 2009), 효과적인 정책 이행을 위해서는 이들 지역의 특성을 고려한 취약성 분석을 바탕으로 지역 수준에서 적응정책을 수립하는 것이 무엇보다 중요하다고 볼 수 있다(Tompkins and Adger, 2004; Adger et al., 2005; Norman, 2009; Hamin et al., 2014).

이와 관련해서 최근 기후변화 적응 관련 문헌들은 선행연구들의 한계를 보완한 대안으로 장소 중심적 접근방법(place-based approach)을 제안한다(Adger and Kelly, 1999; Turner et al., 2003; Wilbanks, 2003; Cutter et al., 2008; 김동현 외, 2013). 그 동안의 기후변화 대응 대책은 실질적으로 수립되고 이행되기 어려운 구조 속에 놓여 있었는데, 이는 기존의 기후변화 대응 대책이 주로 국가 수준, 시·도와 같은 광역적 수준에서 이루어져 수립과 이행 과정에서 책임 소재를 묻기 어렵고, 추진기관이 모호하여 계획을 실제로 이행하는 데 있어 우선순위에서 배제되는 등의 어려움을 겪고 있었기 때문이다(김동현 외, 2013). 국가에 의해 주도되어 온 전통적인 하향식 공간계획은 주로 수직적으로 이루어졌으며, 큰 틀에서 적용대상과 기능에 집중된 탓에 비용 및 정책의 중복, 이행의 지연, 정책 효과 측정의 모호성 등의 문제를 야기하였다.

이에 따라 최근에는 기후변화 적응대책의 수립과 이행에 있어 국가 하위 단위인 도시 및 지역을 관할하는 지방정부 또는 시정부 단위에서 추진되는 것이 해당 지역의 이해당사자들의 니즈(needs)를 반영하고 기존 지역의 문제점을 보완할 수 있어 효율성과 효과성 측면에서 보다 적절한 것이라는 주장이 지속적으로 제기되고 있다. 기후변화 취약성을 정의한 IPCC(2007) 또한 효과적이고 장기적인 기후변화 정책으로서 공간계획방법을 중요한 수단 중 하나로 택한 바 있다. 이들은 기후변화로 인한 노

출의 정도, 민감도, 적응능력 등이 지역이 가진 맥락에 따라 다른 양상을 보일 수 있기 때문에 기후 변화 적응정책 또한 지역에 내재된 특성 즉, 지리적 변동성(geographical variability)을 고려한 장소 중심적 접근방법의 수립의 중요성을 역설한다.

III. 연구 자료 및 분석방법

1. 폭염 취약성 평가모형 설계

폭염 취약성 평가는 어떠한 구성요소를 통해 이루어지는가? 앞서 언급된 바와 같이 기후변화 취약성 개념은 기후변화라는 외적 스트레스에 대한 개인과 지역 사회의 내적 시스템의 통합적인 문제로 볼 수 있다(Kelly and Adger, 2000; Fussel and Klein, 2006). 다시 말해, 기후변화에 따른 노출이 해당 지역이 가진 민감도에 따라 잠재적 영향으로 나타나게 되고, 지역이 가지고 있는 적응능력에 따라 최종적인 지역의 기후변화 취약성이 결정된다(IPCC, 2007). IPCC(2007)가 제시한 취약성 평가의 첫 번째 요소인 기후노출은 연평균 기온, 강수량, 해수면 상승, 태풍 등의 기후변화로 인한 현상을 포함하는 개념으로 이해할 수 있다(Füssel and Klein, 2006). 두 번째 요소인 민감도의 경우, 시스템의 민감도가 높은 경우에는 기후변화에 대한 시스템이 반응하는 정도가 높기 때문에 기후가 약간

만 변화해도 상당한 영향을 받는 것을 관찰할 수 있다. 일반적으로 시스템이 가진 민감도에 영향을 미치는 요소들은 지역이 가진 사회, 경제, 문화, 정치, 환경적 조건들을 반영하고 있다(고재경·김희선, 2009). 마지막 요소인 적응능력은 기후변화로 인한 영향으로부터 얼마나 빠르게 적응하여 회복할 수 있는지를 나타내므로 기후변화로 인한 피해를 완화시키는 데에 기여할 수 있는 지역의 녹지비율, 무더위쉼터, 의료·복지 및 행정 서비스에 대한 접근성 등을 포함한 요소들이 고려된다(Smit and Pilifosova, 2001; Adger, 2003; Grothmann and Patt, 2005; Heinrichs et al., 2013; Huang et al., 2013; Cheng et al., 2017; Carter, 2018). 앞선 기후변화 취약성 평가에 대한 선행연구들의 논의를 바탕으로 설정한 폭염 취약성의 평가 틀은 <Figure 2>와 같다.

2. 연구의 자료 및 측정지표 구성

본 연구는 2015년 기준 기후변화 취약성 통합 평가 모형을 구축하기 위해 선행연구를 바탕으로 <Table 1>의 내용과 같이 기후변화 취약성 평가요소인 기후노출, 민감도, 적응능력 각각에 대한 측정 지표들에서 기후변화 제시하였다. 본 연구에서 활용한 지표들을 구체적으로 살펴보면, 폭염에 대한 기후노출을 나타낼 수 있는 측정지표로 박두선 외



Figure 2. A framework for assessing the vulnerability to climate change

(2017) 등의 연구를 참고하여 2014년 기상청에서 발간한 「서울특별시 구별 기후변화 상세 분석보고서」 내 2011-2020 일평균기온(동별), 2011-2040 폭염일수(동별), 2011-2040 열대야일수(동별) 자료를 활용하였다. 「서울특별시 구별 기후변화 상세

분석보고 RCP 시나리오를 기반으로 서울시 행정동 단위로 분석된 2100년까지의 기온, 강수량, 극한 기후에 대한 미래 전망 내용을 담고 있는데, 본 연구에서는 RCP 8.5(현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우)를 기준으로 분석하였다. 기후노출을 나타내는

Table 1. Measurement indicators and data sources

Category	Measurement indicator	The spatial unit of observation	Data source
Climate exposure	• 2011-2020 daily mean temperature	• Dong	• A Report on Climate Change across Gu in Seoul (Korea Meteorological Administration, 2014)
	• 2011-2040 the number of days with heat waves	• Dong	• A Report on Climate Change across Gu in Seoul (Korea Meteorological Administration, 2014)
	• 2011-2040 the number of days with tropical nights	• Dong	• A Report on Climate Change across Gu in Seoul (Korea Meteorological Administration, 2014)
Sensitivity	• The proportion of population over the age of 65	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• The proportion of recipient households of receiving National Basic Livelihood Security Act benefits	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• The proportion of recipients of receiving National Basic Livelihood Security Act benefits	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• The proportion of low-income elders	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• The proportion of the elderly who lives alone	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• Youth dependency ratio	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• Old dependency ratio	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• The number of micro start-up business	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
Adaptive capacity	• Population density	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• The proportion of disabled people	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• Heat wave rest areas	• Dong	• Heat Wave Shelter Service across Gu in Seoul (Ministry of the Interior and Safety, 2015)
	• The number of leisure facilities for the elderly	• Gu	• The Statistics of Seoul (Seoul, 2015)
	• The number of public health centers	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• The number of beds in hospitals	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• The proportion of medical service personnels	• Dong	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)
	• Green areas	• Gu	• The Statistics of Dong (Seoul, 2015)

지표들 간에 어느 정도의 일관성을 가지고 있는지를 측정하는 크론바흐 알파(Cronbach's alpha) 값은 0.7920로 나타나 측정지표들 간 신뢰성은 매우 높은 것으로 나타났다.

본 연구는 기후 외부 자극에 의해 지역이 받는 영향의 수준을 결정하는 민감도를 측정하기 위하여 지역의 사회경제적 민감도를 대표할 수 있는 지표들을 고려하였다. 박두선 외(2017)의 연구는 폭염에 대한 민감도와 관련된 지표로 폭염에 취약한 만 14세 이하 인구수, 만 65세 이상 인구수, 기초생활수급자비율 등을 제시하였다. 해외에서는 Garssen et al.(2005), Johnson et al.(2005), Hajat et al.(2007), Wolf and McGregor(2013) 등의 연구가 공통적으로 만 65세 이상 인구수를 폭염에 대한 민감도 측정지표로 제시한 바 있으며, Klinenberg(2003), Michelozzi et al.(2005), Fouillet et al.(2006) 등의 연구는 저소득노인, 기초생활수급자, 장애인 등과 같이 사회경제적으로 취약한 계층 및 사회적 고립도가 높은 계층과 관련된 측정지표를 고려해야 함을 강조하였다.

선행연구를 바탕으로 본 연구는 폭염에 대한 민감도를 측정할 수 있는 지표로 기후변화 취약계층을 고려하여 만 65세 이상 인구비율(동별), 국민기초수급가구비율(동별), 국민기초수급자비율(동별), 저소득노인비율(동별), 독거노인비율(동별), 유년부양비(동별), 노년부양비(동별), 생계형사업 사업체수(동별), 인구밀도(동별), 장애인수비율(동별) 등으로 구성하였다. 유년부양비는 만 15~64세 인구에 대한 만 0~14세 인구의 백분비를 나타내며, 노년부양비는 만 15~64세 인구에 대한 만 65세 이상 인구의 백분비를 나타낸다. 이와 같이 민감도라는 요인은 총 10개의 측정지표로 구성되었으며, 이들 지표 값들의 크론바흐 알파 값은 0.8538로 나타나 측정지표들 간 내적 일관성은 매우 높은 것으로 나타났다.

마지막 요인인 적응능력은 폭염 관련 기후노출과 민감도로 인한 부정적인 영향을 완화할 수 있는 능력을 나타낸다. 다수의 국내외 선행연구들은 폭염에 대한 지역의 적응능력에 있어 의료 및 복지 시설, 녹지의 중요성을 강조해왔으며, 이를 나타낼 수 있는 지표로 인구당 응급의료기관 및 의료인력 수, 녹지면적, 공원 수 등을 제시한 바 있다(박두선 외, 2017; Sternberg, 2003; Smit and Wandel, 2006; Heinrichs et al., 2013; Araya-Muñoz et al., 2016). 본 연구에서는 자료의 구독성을 고려하여 무더위쉼터와 같이 폭염에 대한 지역의 실질적 적응능력을 나타낼 수 있는 지표를 추가적으로 고려하였다. 이를 바탕으로 본 연구는 적응능력의 측정지표로 폭염을 피할 수 있는 무더위쉼터를 비롯하여 보건소 수, 의료인력비율 등의 의료·복지 부문, 공원, 임야 등의 녹지 부문으로 구분하여 구성하였으며, 의료·복지 부문은 무더위쉼터(동별), 노인여가복지시설(구별), 보건소 및 보건분소 수(동별), 병상수(동별), 의료인력비율(동별)을 이용하였으며, 녹지 부문은 녹지면적(구별) 자료를 활용하였다. 서울시 동별 무더위쉼터는 행정안전부에서 제공하는 서울특별시 구별 무더위쉼터 현황 자료를 활용하였으며, 경로당, 노인복지센터와 같은 노인시설, 동사무소 등의 주민센터, 자치회관 등을 포함하고 있다. 총 6개의 측정지표로 구성된 적응능력의 경우 크론바흐 알파 값이 0.4080의 값을 보여 기후노출과 민감도에 비해 상대적으로 측정지표들 간 신뢰성은 낮은 것으로 나타났지만, 이는 적응능력이 기후노출, 민감도에 비해 상관관계가 낮을 수 있는 측정지표들을 함께 다루고 있기 때문인 것으로 판단된다.

〈Table 1〉에 구축된 각 부문 내 지표들은 최종적으로 폭염 관련 기후변화 취약성 지수로 통합되어 계산되는데, 각 측정지표들이 서로 다른 측정단위를 가지는 탓에 한 부문 내에서 하나의 지수값으로 통합하는 과정에 주의를 기울일 필요가 있

다. 예컨대, 적응능력 부문 내 무더위쉼터의 경우 개수로 측정되는 반면, 녹지면적은 면적 단위인 m^2 으로 측정되기 때문에 서로 다른 측정단위를 가지는 지표 값들을 그대로 고려하기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구는 서로 다른 단위에서 측정된 지표 값을 각 변수의 평균과 표준편차를 활용하여 표준화하고 <식 2>의 VRI 모형을 응용하여 가중치를 부여함으로써 폭염 취약성 지수 값을 산정하였다.

$$VRI = \frac{\frac{Climate\ Exposure + Sensitivity}{2} + Adaptive\ Capacity}{2} \quad \langle \text{식 2} \rangle$$

Moss et al.(2001), 유가영·김인애(2008), 윤성권 외(2013) 등의 연구에서 활용된 <식 2>의 VRI에 따르면, 기후노출 지수와 민감도 지수에는 적응능력 지수보다 낮은 가중치를 부여하고 있는데 이는 <Figure 2>를 반영한 결과로 볼 수 있다. <Figure 2>에서 기후노출과 민감도가 합쳐져 잠재적 영향을 가져오고, 잠재적 영향은 적응능력과 합쳐져 취약성을 결정하기 때문이다. 일반적으로 VRI에서는 탄력성이라는 개념을 포함하고 있기 때문에 기후노출과 민감도에 음(-)의 부호를 부여하고, 적응능력에 양(+)의 부호를 부여하여, 취약성이 클수록 VRI의 값이 작아지는 관계에 놓여 있다. 하지만 본 연구에서는 취약성 개념 자체에 초점을 두고 기후노출과 민감도에 양(+)의 부호, 적응능력에 음(-)의 부호를 부여하기 때문에, 최종적으로 산정된 지수 값이 폭염 취약성과 정(+)의 관계를 가지게 된다는 점을 유념할 필요가 있다.

3. 폭염 취약성 지수의 공간적 연관 구조

폭염 취약성 지수의 공간적 연관 패턴은 탐색적

공간자료분석 방법 중 전역적 Moran's I 통계량(global Moran's I statistics) 그리고 국지적 Moran's I_i 통계량(local Moran's I_i statistics)을 통해 확인될 수 있다. 공간자기상관성 분석은 특정 현상의 공간적 패턴을 기술하고 설명하는 데 있어서 공간적 배열이 우연한 것인지 아니면 유사한 변량을 가진 지역들이 공간적으로 일련의 패턴을 형성하고 있는지를 탐색하기 위한 분석방법이다. 그 중에서도 전역적 공간자기상관성 분석은 전역적 Moran's I 통계량을 이용하여 연구 대상지역 내에 존재하는 유사한 값들 간의 일반적인 군집경향을 파악하는데 활용될 수 있다(Anselin, 1988). 전역적 Moran's I 통계량은 지역 간 인접성을 나타내는 공간가중치행렬(spatial weights matrix)을 바탕으로 하여 인접한 지역들 간 속성값의 유사성을 측정하는 것이다. 전역적 Moran's I 통계량의 기본적인 형태는 <식 3>과 같다.

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad \langle \text{식 3} \rangle$$

<식 3>의 I 는 전역적 Moran's I 통계량의 값을 의미한다. 우항의 N 은 분석대상이 되는 지역의 수를, \bar{X} 는 해당 지역의 평균적인 속성값을 나타내며, X_i 와 X_j 는 i 지역의 속성값과 j 지역의 속성값을 각각 나타낸다. w_{ij} 는 공간가중치행렬을 구성하는 가중치를 의미한다. 전역적 Moran's I 통계량은 -1에서 1 사이의 값을 가지게 되는데, 1의 경우 완전한 양의 자기상관 관계(positive spatial autocorrelation), -1의 경우 완전한 음의 자기상관 관계(negative spatial autocorrelation)가 존재함을 보여준다. 예컨대, 높은 취약성 지수 값을 보이는 지역들이 공간적으로 서로 인접 또는 낮은 취약성

지수 값을 보이는 지역들이 공간적으로 서로 인접한 경향이 강할수록 1에 가까운 값을 갖게 되는 반면, 높은 취약성 지수 값을 보이는 지역과 그렇지 않은 지역이 규칙적으로 혼합되어 분포하는 공간 패턴을 나타내면 -1에 가까운 값을 가지게 된다. 하지만 전역적 Moran's I 통계량은 지역 전체의 공간자기상관성을 하나의 값으로 나타내기 때문에 국지적 수준에서의 공간적 군집경향에 대한 정보는 제공하지 못한다는 한계를 가지므로(Anselin, 1988; Fotheringham et al., 2000), 국지적 수준에서의 이를 보완할 수 있는 분석이 함께 수행될 필요가 있다.

국지적 공간자기상관성 분석을 위한 방법으로는 LISA(Local Indicator of Spatial Association)의 일종인 국지적 Moran's I_i 통계량을 활용할 수 있다(Anselin, 1995). 국지적 Moran's I_i 통계량은 특정 지역의 속성값과 인접한 주변지역들의 속성값에 대한 공간가중 평균값이 유사하게 나타나는 경우엔 양의 공간자기상관으로, 상이하게 나타나는 경우에는 음의 공간자기상관으로 추정한다. 국지적 Moran's I_i 통계량을 통해 상호 유사한 값을 가지는 공간적 군집의 유의성을 검정할 수 있으며 국지적 군집이 나타나는 지역을 탐색할 수 있다. 국지적 Moran's I_i 통계량은 다음의 <식 4>와 같이 표현된다.

$$I_i = \left(\frac{x_i}{m_0} \right) \sum_j w_{ij} x_j \quad \langle \text{식 4} \rangle$$

<식 4>에서 I_i 는 국지적 Moran's I_i 통계량의 추정값을 의미한다. x_i 와 x_j 는 i 지역의 속성값과 j 지역의 속성값을 각각 나타낸다. w_{ij} 는 공간가중치 행렬을 구성하는 가중치를, m_0 는 $\sum_i x_i^2/n$ 의 식을 통해 계산되는 평균적인 속성값을 의미한다. 추정된 국지적 Moran's I_i 통계량은 크게 네 가지의 국지

적 공간 연관성의 양상으로 범주화할 수 있는데, H-H(High-High, 높은 값이 높은 값에 의해 둘러싸여 있음), L-L(Low-Low, 낮은 값이 낮은 값에 의해 둘러싸여 있음), H-L(High-Low, 높은 값이 낮은 값에 의해 둘러싸여 있음), L-H(Low-High, 낮은 값이 높은 값에 의해 둘러싸여 있음) 유형이 그것이다. 구체적으로 살펴보면, 양(+의 공간자기상관을 가지는 H-H 유형과 L-L 유형은 국지적 차원의 유사한 경향을 갖는 취약성 지수들이 공간적으로 군집되어 있음을 의미하며, 음(-의 공간자기상관을 가지는 H-L 유형과 L-H 유형은 서로 상이한 경향을 갖는 취약성 지수들이 공간적으로 군집되어 있음을 의미한다. 이 분류를 바탕으로 일종의 명목지도인 LISA 군집지도(LISA cluster map)를 작성함으로써 국지적 수준에서 폭염 취약성에 대해 유의미하게 높은 값의 공간 클러스터인 '핫스팟(hot spot)'과 유의미하게 낮은 값의 공간 클러스터인 '콜드스팟(cold spot)', 그리고 주변 지역과 유의미하게 다른 특성을 보이는 공간단위인 '공간 특이점(spatial outliers)'을 확인할 수 있다(이상일 외, 2016).

IV. 폭염 취약지역에 대한 실증분석 결과

1. 폭염 취약성 지수의 공간적 분포 및 공간적 연관 구조 분석 결과

본 연구는 2015년 기준 서울시 행정동 단위에서 사분위수(quartile)를 이용하여 폭염 취약성의 공간적 분포를 시각화하여 살펴보고자 한다. 그리고 도시지리학에서 광범위하게 활용되는 탐색적 공간자료분석을 통해 서울시 폭염 취약성의 공간적 의존성(spatial dependency)을 측정하고, 국지적으로 폭염 취약성의 핫스팟 및 콜드스팟을 확인하고, 공간

특이점을 확인하고자 한다.

서울시 내 폭염 취약성의 공간적 분포는 어떻게 나타나는가? 사분위수로 구분하여 살펴본 서울시 내 폭염 취약성의 공간적 분포는 <Figure 3>과 같다. 사분위수는 자료를 크기 순으로 배열하고, 누적 백분율을 4등분한 각 점에 해당하는 값을 의미한다. 본 연구에서 계산된 폭염 취약성 지수 값은 최솟값이 -2.77이며, 최댓값은 1.5이다. 누적 백분율이 25%, 50%, 75%, 100%에 해당하는 제1사분위수, 제2사분위수, 제3사분위수, 제4사분위수는 각각 -0.0328, 0.0396, 0.386, 1.5로 나타났다. <Figure 3>은 사분위수 지도(quartile map)를 그린 것으로, G1은 누적 백분율 25%에 속한 행정동, G2는 누적 백분율 25%에서 50% 사이에 속한 행정동, G3은 누적 백분율 50%에서 75% 사이에 속한 행정동, G4는 누적 백분율 75%에서 100% 사이에 속한 행정동들의 집합이다. G1에 속한 행정동이 폭염에 상

대적으로 가장 덜 취약하며, G4에 속한 행정동은 폭염에 상대적으로 가장 취약하다고 볼 수 있다.

<Figure 3>에서 G1에 속한 한강 이북의 은평구, 서대문구, 마포구, 강북구, 노원구 일대와 한강 이남의 구로구, 관악구, 서초구 일대의 폭염 취약성이 타 지역에 비해서 상대적으로 낮는데 비해 G4에 속한 한강 이북의 종로구, 중구, 용산구, 성북구, 성동구 일대와 한강 이남의 강남구, 송파구 일대의 폭염 취약성은 상대적으로 높은 패턴을 확인할 수 있다. 폭염 취약성 사분위 지도는 서울 중부(종로구, 중구, 용산구 일대)와 일부 남부(강남구, 송파구 일대) 및 북부(성북구, 성동구 일대) 지역에 폭염 취약성이 높은 행정동들이 많이 위치해있음을 보여 준다.

추가적으로 본 연구는 서울시 행정동의 폭염 취약성 지수의 공간적 연관 패턴을 파악하기 위하여 탐색적 공간자료분석을 수행하였다. 탐색적 공간자

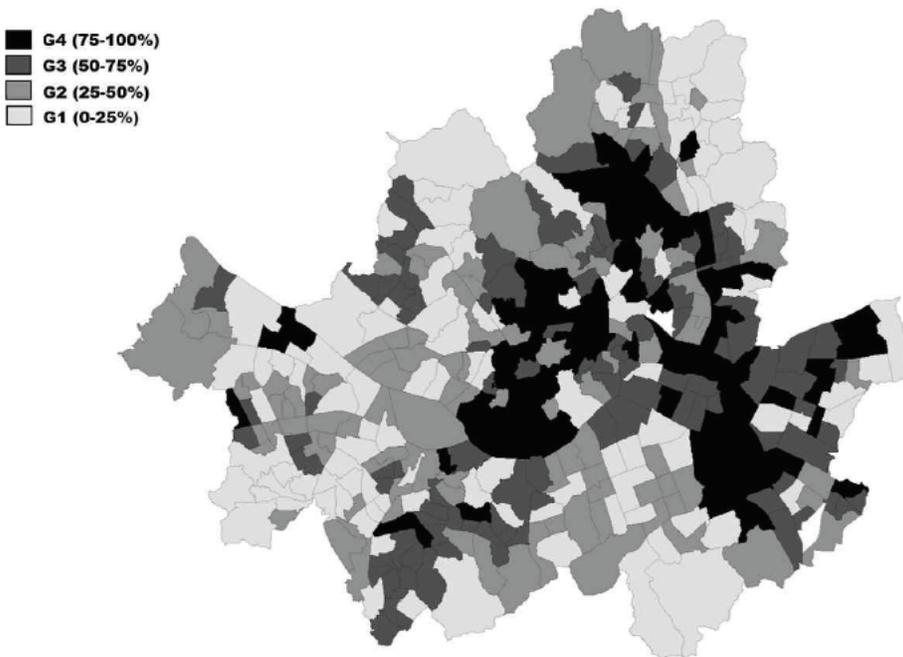


Figure 3. Spatial pattern of heat wave vulnerability index in Seoul

료분석에서 가장 기본적인 접근 방법은 공간적 특성을 가진 변수가 전체 연구지역에 걸쳐 공간적 의존성을 가지고 있는지를 살펴보는 것이다. 폭염 취약성의 공간적 의존성을 살펴보기 위해 본 연구는 전역적 Moran's I 통계량을 이용하여 폭염 취약성 지수의 공간자기상관성을 측정하였다. 공간자기상관성 분석은 공간상의 인접함으로 인해 나타나는 파급효과를 모형에서 고려함으로써 보다 엄밀한 분석을 가능하게 한다. 본 연구는 공간자기상관성 분석을 위해 공간가중치행렬 구성으로 Queen 방식의 공간 인접성(spatial contiguity)을 기준으로 하였다.

앞서 언급했던 것과 같이, 전역적 Moran's I 지수는 1에 가까운 값을 가질수록 인접한 공간 단위가 전체 연구지역에 걸쳐서 유사한 값을 보이는 양(+)의 공간자기상관을 보여준다. 본 연구에서의 폭염 취약성 지수의 전역적 Moran's I 값은 통계적으로 유의한 0.2857의 값을 보이는 것으로 나타

났는데, 이는 서울시 내 폭염 취약성이 상당 수준의 양(+)의 공간자기상관성을 보이고 있음을 나타내는 결과이다. 앞서 살펴본 전역적 Moran's I 지수는 연구 대상인 서울시 전체에 대하여 공간자기상관성을 파악하는데 주안점을 두고 있어 국지적 수준에서의 공간적 의존성과 군집성에 대한 정보는 제공하지 못한다는 한계를 가진다. 따라서 본 연구는 전역적 Moran's I 의 로컬 버전인 국지적 Moran's I_i 통계량을 이용한 LISA 군집지도를 통해 국지적 수준에서의 폭염 취약성 지수에 대한 공간적 군집 패턴을 살펴보았다(Figure 4).

앞선 전역적 Moran's I 지수의 결과와 유사하게(Figure 4)의 LISA 군집지도는 폭염 취약성이 국지적으로 공간적 연관성을 가지고 있음을 보여준다. 폭염 취약성의 LISA 군집지도를 살펴보면 한강 이북 지역인 종로구, 중구, 용산구 일대 및 한강 이남 지역 중 강남구 일부 지역에서 H-H 유형이 관찰

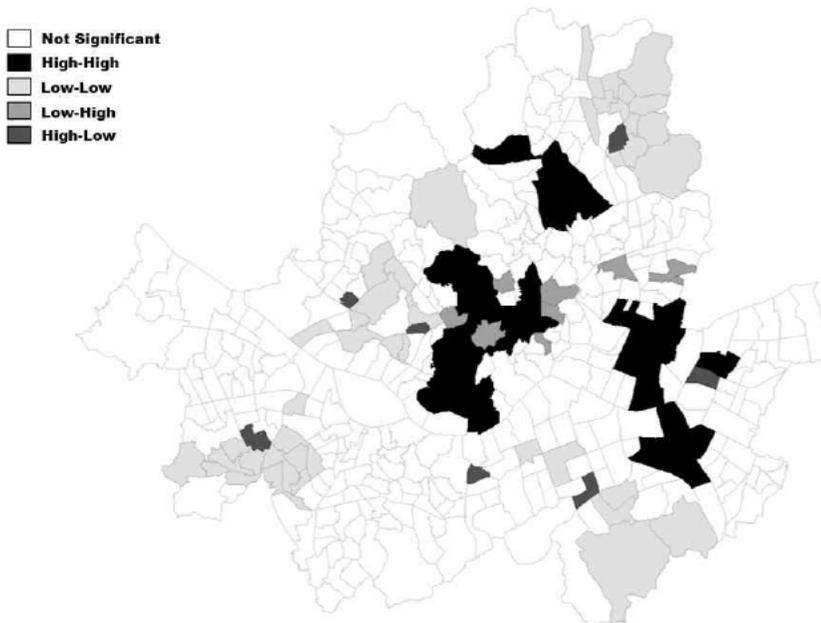


Figure 4. Spatial clustering pattern of heat wave vulnerability index in Seoul

됨에 따라 해당 행정동과 이웃한 주변 행정동들이 모두 폭염 취약성이 높은 핫스팟 지역임을 확인할 수 있었다. 반면 한강 이북 지역 중 은평구, 서대문구, 마포구, 종로구, 도봉구, 노원구 일대와 더불어 한강 이남 지역 중 구로구, 관악구, 서초구 일부 지역에서 L-L 유형이 관찰됨에 따라 이들 지역은 해당 행정동과 이웃한 주변 행정동들이 모두 폭염 취약성이 낮은 콜드스팟으로 확인되었다. 중구 일부 행정동(소공동, 필동), 종로 일부 행정동(이화동), 성동구 일부 행정동(금호1가동, 왕십리도선동), 동대문구 일부 행정동(용신동, 휘경2동), 중랑구 일부 행정동(변복3·8동) 등은 L-H 유형을 띠는 주요 행정동들로 나타났는데, 이는 해당 행정동의 폭염 취약성이 낮아 이북한 주변 행정동들은 폭염에 대한 취약성이 높은 상태임을 보여준다. 마지막으로 서대문구 일부 행정동(북아현동, 남가좌1동), 양천구 일부 행정동(신정7동), 서초구 일부 행정동(방배본동), 강남구 일부 행정동(도곡2동), 송파구 일부 행정동(풍납1동), 노원구 일부 행정동(중계2·3동)은 H-L 유형으로, 해당 행정동은 이웃한 주변 행정동들이 폭염 취약성이 낮은 것과 대비되는 높은 폭염 취약성을 보여주고 있다.

2. 적응능력 수준에 따른 지역 유형화

앞선 기후변화 연구들에서도 강조했듯이 폭염에 효과적으로 대응하기 위해서는 지역의 적응능력을 높이는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구는 기후노출과 민감도에 의해 지역이 받는 잠재적 피해를 완화시킬 수 있는 지역의 적응능력에 주목한다. 하지만 한정된 재원을 감안할 때 모든 폭염 취약지역에 대한 폭염 적응형 정책 지원은 현실적으로 불가능하다. 정책의 부작용을 줄이고 예산의 효과성을 높이기 위해 본 연구는 2015년 기준 서울시 내 적응능력이 상대적으로 높은 행정동과 낮은 행정동을

선별하고자 하였다. 이를 위하여 기후노출과 민감도를 산술평균한 지수 값을 기준으로 적응능력이 반영되기 전(ES: Average(Climate Exposure, Sensitivity))과 후(ESC: Average(Average(Climate Exposure, Sensitivity), Adaptive Capacity)) 값 사이의 행정동별 순위 변화를 살펴보았다. <Table 2>와 <Table 3>은 각각 서울시 전체 424개 행정동을 대상으로 기후노출과 민감도를 고려한 경우(ES)와 기후노출, 민감도에 적응능력을 추가하여 고려한 경우(ESC) 간 행정동별 순위 변화 값의 상위 20개와 하위 20개 동을 보여준다. 다시 말해, <Table 2>는 높은 적응능력에 의해 기후노출과 민감도로 인한 잠재적 피해를 완화시킨 행정동을 보여주고, <Table 3>은 낮은 적응능력으로 인해 기후노출과 민감도로 인한 잠재적 피해를 악화시킨 행정동을 보여준다.

<Table 2>에서 적응능력이 상대적으로 높은 지역은 마포구 성산2동, 동대문구 용신동, 영등포구 영등포동, 송파구 풍납2동 순으로 나타났다. 마포구 성산2동의 순위는 적응능력을 고려하기 이전에 비해 308순위 상승했는데, 이는 동대문구 용신동의 379순위 상승, 영등포구 영등포동의 278순위 상승, 송파구 풍납2동의 278순위 상승과 비교하였을 때 가장 큰 순위 향상을 보여준다. 다시 말해 마포구 성산2동이 서울시 전체 행정동 중에서 기후노출과 민감도에 의한 잠재적 피해를 크게 완화시킬 만큼 폭염에 대한 지역의 적응능력이 매우 높음을 의미한다.

반면 적응능력이 상대적으로 낮아 폭염으로 인한 피해를 더욱 악화시킬 수 있는 지역은 종로구 창신3동, 중구 장충동, 중구 동화동, 종로구 혜화동 순으로 나타났다(<Table 3>). 종로구 창신3동의 순위 변화는 적응능력을 고려하기 이전에 비해 266순위 하락(86위→352위)했는데, 이는 2015년 서울시 424개 행정동 중 가장 큰 폭으로 하락한 수치이다. 이

서울시 폭염 취약지역의 공간적 패턴 및 적응능력 취약지역 분석

Table 2. The top 20 dong of differences between ESC ranking and EC ranking

Ranking	The top 20 dong		ESC index	ESC ranking	ES index	ES ranking	Changes in rankings (ESC-ES)
1	Mapo-gu	Seongsan-2-dong	-0.4004	391	0.3543	83	308
2	Dongdaemun-gu	Yongsin-dong	-0.1238	292	0.8911	13	279
3	Yeongdeungpo-gu	Yeongdeungpo-dong	-0.1265	293	0.8817	15	278
3	Songpa-gu	Pungnap-2-dong	-1.0442	421	0.1885	143	278
5	Seocho-gu	Banpo-4-dong	-0.5698	407	0.2116	137	270
6	Gangnam-gu	Dogok-1-dong	-0.3154	366	0.2760	110	256
7	Guro-gu	Guro-5-dong	-0.5939	410	0.1671	157	253
8	Guro-gu	Guro-2-dong	-0.4627	397	0.1764	149	248
9	Yeongdeungpo-gu	Dangsan-1-dong	-0.0976	277	0.5333	33	244
10	Yeongdeungpo-gu	Darim-1-dong	-0.4415	393	0.1750	151	242
11	Yeongdeungpo-gu	Mullae-dong	-0.1112	283	0.4529	51	232
12	Gangdong-gu	Gil-dong	-0.5056	402	0.1173	179	223
13	Guro-gu	Gocheok-2-dong	-0.1659	312	0.2943	105	207
13	Jongno-gu	Gyonam-dong	-0.1862	319	0.2759	112	207
13	Gangseo-gu	Hwagok-1-dong	-0.3558	378	0.1421	171	207
16	Guro-gu	Gaebong-1-dong	-0.3229	370	0.1421	170	200
17	Gangnam-gu	Samsung-1-dong	-0.1978	326	0.2288	128	198
18	Seocho-gu	Seocho-2-dong	-0.0611	263	0.3716	77	186
19	Nowon-gu	Wolgye-3-dong	-0.3019	359	0.1281	175	184
19	Dongdaemun-gu	Heogi-dong	-0.4439	394	0.0364	210	184

* ESC: Average(Average(Climatic Exposure, Sensitivity), Adaptive Capacity)

** ES: Average(Climatic Exposure, Sensitivity)

Table 3. The bottom 20 dong of differences between ESC ranking and EC ranking

Ranking	The bottom 20 dong		ESC index	ESC ranking	ES index	ES ranking	Changes in rankings (ESC-ES)
1	Jongno-gu	Changsin-3-dong	0.2646	86	-0.3605	352	-266
2	Jung-gu	Jangchung-dong	0.2216	106	-0.4487	368	-262
3	Jung-gu	Donghwa-dong	0.3781	44	-0.1599	301	-257
4	Jongno-gu	Hyehwa-dong	0.3259	68	-0.2261	323	-255
5	Jongno-gu	Samcheong-dong	0.2195	107	-0.3553	351	-244
6	Jongno-gu	Gahoe-dong	0.3656	51	-0.1460	291	-240
7	Gwanak-gu	Sinsa-dong	0.2752	82	-0.2059	315	-233
8	Jongno-gu	Sajik-dong	0.3834	40	-0.0762	263	-223
8	Jung-gu	Dasan-dong	0.379	43	-0.0849	266	-223
10	Gwanak-gu	Sinwon-dong	0.2589	91	-0.1926	310	-219
11	Gwanak-gu	Jowon-dong	0.2544	93	-0.1569	296	-203
12	Gwanak-gu	Cheongnim-dong	0.1068	159	-0.4069	361	-202
13	Yongsan-gu	Itaewon-2-dong	0.1348	142	-0.2744	332	-190
14	Gwanak-gu	Sillim-dong	0.0538	189	-0.5605	378	-189
15	Jung-gu	Sindang-5-dong	0.4669	21	0.0406	208	-187
16	Gwanak-gu	Seonghyeon-dong	0.1126	154	-0.3185	340	-186
17	Songpa-gu	Wirye-dong	0.1550	133	-0.2132	317	-184
18	Gwanak-gu	Seorim-dong	0.0173	215	-0.7059	392	-177
19	Gwanak-gu	Miseong-dong	0.1273	145	-0.2143	318	-173
19	Gwanak-gu	Jungang-dong	0.0242	210	-0.5910	383	-173

* ESC: Average(Average(Climatic Exposure, Sensitivity), Adaptive Capacity)

** ES: Average(Climatic Exposure, Sensitivity)

는 종로구 창신3동은 폭염에 대한 지역의 적응능력이 상대적으로 매우 낮은 탓에 해당 지역이 폭염으로 인한 잠재적 피해가 더 크게 나타날 수 있음을 암시한다.

이들 지역에 대한 기초현황 조사 결과는 앞선 분석 결과를 뒷받침한다. 적응능력이 상대적으로 우수한 지역으로 선정된 마포구 성산2동은 지역에 조성된 녹지 비율이 매우 높았으며, 무더위쉼터, 커뮤니티 시설, 의료시설의 수가 다른 지역에 비해 많은 것으로 나타났다. 또한 무더위쉼터, 커뮤니티 시설, 의료시설이 지역 전반에 걸쳐 균등하게 분포되어 있어 지역 주민들의 기반 시설에 대한 접근성이 매우 높은 것을 확인할 수 있었다. 그에 비해 적응능력이 상대적으로 가장 낮은 지역으로 선정된 종로구 창신3동은 채석장 절개지 위에 위치하고 있어 소방차가 들어가기 어려운 급경사가 매우 많았다. 또한 좁고 경사진 골목에 900여개의 소규모 봉제공장들과 노후주택이 밀집해 있고, 주민들의 쉼터로 활용될 수 있는 커뮤니티 시설, 공원, 녹지는 거의 찾아볼 수 없었으며, 급경사 탓에 이들 기반 시설에 대한 접근성 또한 매우 낮은 수준인 것으로 나타났다. 본 연구는 적응능력 우수지역에 대한 면밀한 분석을 통해 적응능력 취약지역이 가진 문제점을 보완할 수 있는 폭염 적응형 공간계획을 도출하는데 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결론 및 시사점

본 연구는 2015년 서울시 424개 행정동을 대상으로 기후변화에 대한 노출정도, 민감도, 적응능력 등의 기후변화 취약성 기준에 따라 폭염 취약성을 평가하고, 폭염 취약성의 공간적 분포와 더불어 탐색적 공간자료분석의 응용을 통해 서울시 내 폭염 취약지역의 공간적 연관 구조에 대한 실증적 분석

을 수행하였다. 이와 더불어 폭염 적응능력 향상을 위한 공간계획 수립에 선행하여 기후노출과 민감도로 인한 잠재적 피해를 완화시킬 수 있는 지역의 적응능력에 주목하여 적응능력이 상대적으로 우수한 지역과 취약한 지역을 선정하고 이를 비교 분석하였다.

앞선 폭염 취약성 지수의 공간적 분포 및 공간적 연관 구조 분석 결과에 따르면, 폭염에 상대적으로 더 취약한 지역은 종로구, 중구 등 한강 이북의 구도심 지역으로 나타났으며, 은평구, 마포구, 구로구, 관악구, 서초구 등의 지역은 폭염에 상대적으로 덜 취약한 지역으로 나타났다. 폭염 취약성 지수가 높을수록 폭염에 더 취약해 맞춤 대응 정책이 필요하다. 폭염에 더 취약한 지역의 경우, 기후노출과 민감도 수준은 높은 반면 무더위쉼터, 의료시설 등 폭염 취약성을 경감시킬 수 있는 적응능력 수준은 낮은 경우가 많다. 적응능력의 중요성을 인지한 많은 연구들은 지역 맞춤형 폭염 적응형 정책 수립을 강조한다. 이에 따라 본 연구는 정책의 비용효과성을 높이기 위해 2015년 기준 서울시 내 적응능력이 상대적으로 높은 행정동과 낮은 행정동을 선별하였다. 폭염에 대한 적응능력이 상대적으로 가장 높은 지역은 마포구 성산2동으로 나타났으며, 적응능력이 상대적으로 가장 낮은 지역은 종로구 창신3동으로 나타났다. 마포구 성산2동과 비교하였을 때 종로구 창신3동은 대부분 좁은 골목을 사이에 둔 노후주택 밀집지역으로 구성되어 있고, 동사무소, 경로당 등 커뮤니티 시설에 대한 접근성은 매우 낮은 수준이었으며 주민들의 쉼터 역할을 하는 공원, 녹지 또한 매우 부족한 것으로 나타나 적응능력 향상을 위한 정책 지원이 시급한 것으로 나타났다.

본 연구는 탐색적 공간자료분석 기법을 활용하여 서울시 행정동 수준에서의 폭염 취약성의 공간적 분포에 대한 입체적인 해석을 통해 보다 진전된 실

증적 평가의 기초를 제공할 수 있다. 앞선 이론적 논의 및 실증 분석 결과를 바탕으로 폭염 취약계층 및 취약지역을 위한 폭염 적응 정책을 설계하는 과정에서 실증적 자료로서도 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구는 폭염 적응능력이 상대적으로 우수한 지역을 선별하고 해당 지역에 대한 기초 현황조사를 수행함으로써 폭염 적응능력이 낮은 지역에 적용할 수 있는 정책을 제안하고, 도시계획, 지역계획, 국토계획 등을 포함한 공간계획의 가이드 라인을 예시적으로 제시해 줄 수 있을 것으로 기대 된다.

주1. 기상청의 「서울특별시 구별 기후변화 상세 분석보고서」 자료에서의 기후변화 시나리오는 IPCC에서 5 차 평가보고서용으로 발표한 온실가스 배출 시나리오인 RCP 시나리오를 기초로 하고 있다. 온실가스 배출 시나리오는 기본 4종으로 구성되는데, 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우(RCP 2.6), 온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 경우(RCP 4.5), 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우(RCP 6.0) 그리고 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우(RCP 8.5)가 포함된다. 본 연구에서는 기후변화가 가장 두드러지는 조건에서의 폭염 취약성을 분석하기 위해 온실가스 배출 수준을 현재 추세대로 유지하였을 경우(RCP 8.5)의 자료를 기준으로 분석하였다(김소윤 외, 2016).

인용문헌

References

1. 고재경·김희선, 2009. 「경기도 기후변화 취약성 평가 연구」, 경기: 경기개발연구원.
Go, J. K. and Kim, H. S., 2009. *A Study on Vulnerability Assessment to Climate Change in Gyeonggi-Do*, Gyeonggi: Gyeonggi Research Institute.
2. 고재경·김희연·이양주·이정임·송미영·김동영·강상준, 2013. 「경기도 생활환경복지 지표개발 연구」, 경기: 경기개발연구원.
Go, J. K., Kim, H. Y., Lee, Y. J., Lee, J. I., Song, M. Y., Kim, D. Y., and Kang, S. J., 2013. *A*

Study on Development of Living Environment Welfare Index in Gyeonggi-Do, Gyeonggi: Gyeonggi Research Institute.

3. 구유성·김자은·김지숙·이성호, 2015. “폭염 취약성 평가를 통한 도시의 적응능력 향상”, 「한국지역개발학회지」, 27(5): 331-347.
Koo, Y., Kim, J., Kim, J., and Lee, S., 2015. “Study on the Improvement of Adaptation Ability by Vulnerability Analysis of Heat Wave: The Case of Busan Metropolitan City”. *Journal of Korean Regional Development Association*, 27(5): 331-347.
4. 김동현·이수재·이명진·서혜정, 2013. 「기후변화 적응형 공간계획방법의 개발과 모의적용 연구(I)」, 서울: 한국환경정책·평가연구원.
Kim, D. H., Lee, S. J., Lee, M. J., and Seo, H. J., 2013. *Spatial Planning Method and Applications for Climate Change Adaptation (I)*, Seoul: Korea Environment Institute.
5. 김소윤·윤지윤·김홍석, 2016. “기후변화에 따른 도시 노후건축물의 재해피해 분석”, 「국토계획」, 51(5): 263-275.
Kim, S. Y., Yoon, J. Y., and Kim, H. S., 2016. “Disaster Damage Assessment of Old and Deteriorated Buildings in Urban Area Under the Climate Change Scenarios”, *Journal of Korea Planning Association*, 51(5): 263-275.
6. 명수정·권영한·이영준·이정호·심창섭·정휘철·이명진·신지영·임영신·황선훈·차영화·김나영·서은희·구유성·김세란, 2012. 「기후변화 적응정책 평가 및 인벤토리 구축」, 서울: 한국환경정책·평가연구원.
Myeong, S. J., Kwon, Y. H., Lee, Y. J., Lee, J. H., Shim, C. S., Jung, H. C., Lee, M. J., Shin, J. Y., Lim, Y. S., Hwang, S. H., Cha, Y. H., Kim, N. Y., Seo, E. H., Koo, Y. S., and Kim, S. R., 2012. *Climate Change Adaptation Policy Evaluation and Inventory Building*, Seoul: Korea Environment Institute.
7. 박두선·박보영·정은화, 2017. “VESTAP 기반 기후변화 취약성 평가 지침”, 「한국기후변화학회지」, 8(4): 339-346.

- Park, D. S., Park, B., and Jung, E., 2017. "Guidelines for the VESTAP-based Climate Change Vulnerability Assessment", *Journal of Climate Change Research*, 8(4): 339-346.
8. 박정규·배현주·서양원, 2013. 「기후환경 취약계층의 환경복지 정책연구(I)」, 서울: 한국환경정책·평가연구원.
- Park, J. K., Bae, H. J., and Seo, Y. W., 2013. *A Study of Environmental Welfare Policy for Climate and Environment-susceptible Populations (I)*, Seoul: Korea Environment Institute.
9. 신호성·추장민·임종환, 2010. 「사회보건분야 기후변화 취약성 평가 및 적응역량 강화」, 서울: 한국보건사회연구원.
- Shin, H. S., Choo, J. M., and Lim, J. H., 2010. *Assessing Climate Change Vulnerability and Strengthening Adaptation Capacity in the Field of Social Health*, Seoul: Korea Institute for Health and Social Affairs.
10. 이상일·조대현·이민파, 2016. "일변량 공간연관성 통계량에 대한 비교 연구 (II): 국지적 *Si* 통계량을 중심으로", 「한국지리학회지」, 5(3): 375-396.
- Lee, S. I., Cho, D., and Lee, M., 2016. "Comparing Univariate Spatial Association Statistics (II): Focusing on Local Lee's *Si* Statistics", *Journal of the Association of Korean Geographers*, 5(3): 375-396.
11. 유가영·김인애, 2008. 「기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안」, 서울: 한국환경정책·평가연구원.
- Yoo, G. Y., and Kim, I. H., 2008. *Development and Application of a Climate Change Vulnerability Index*, Seoul: Korea Environment Institute.
12. 윤성권·최봉석·전의찬, 2013. "시흥시 기후변화 취약성 평가 연구", 「한국기후변화학회지」, 4(1): 1-10.
- Yun, S. G., Choi, B. S., and Jeon, E. C., 2013. "A Study on Vulnerability Assessment to Climate Change in Siheung-si", *Climate Change Research*, 4(1): 1-10.
13. 이나영·조용성·임재영, 2014. "폭염으로 인한 기후변화 취약계층의 사망률 변화 분석", 「보건사회연구」, 34(1): 456-484.
- Lee, N. Y., Cho, Y. S., and Lim, J. Y., 2014. "Effect of Climate Change on Mortality Rate Analysis of Vulnerable Populations", *Health and Social Welfare Review*, 34(1): 456-484.
14. 이수재·권영한·조광우·채여라·명수정·한상운·정병철·정선희·빈슬지·김유정·김현서·최지혜, 2013. 「기후변화 적응전략 종합연구」, 서울: 한국환경정책·평가연구원.
- Lee, S. J., Kwon, Y. H., Cho, K. W., Chae, Y. R., Myeong, S. J., Han, S. W., Jung, B. C., Jung, S. H., Bin, S. J., Kim, Y. J., Kim, H. S., and Choi, J. H., 2013. *Comprehensive Research for Climate Change Adaptation Strategy*, Seoul: Korea Environment Institute.
15. 임숙향·곽진, 2014. "폭염 대비 온열질환 감시체계 및 건강수칙 안내", 「주간건강과질병」, 7(33): 726-728.
- Lim, S. H., and Gwak, J., 2014. "Surveillance System of Heat-Related Illness and Precautionary Health Guidance Against Heat Wave", *Public Health Weekly Report*, 7(33): 726-728.
16. 정휘철·이우균·조정길, 2012. 「기초지자체 적응 세부시행계획 수립 시범사업 지원을 위한 기후변화 취약성 연구」, 인천: 국립환경과학원.
- Jung, H. C., Lee, W. K., and Cho, J. K., 2012. *A Study on Climate Change Vulnerability for Supporting Pilot Project of Local Government Adaptation Implementation Planning*, Incheon: National Institute of Environmental Research.
17. Adger, W. N. and Kelly, P. M., 1999. "Social Vulnerability to Climate Change and the Architecture of Entitlements", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4(3-4): 253-266.
18. Adger, W. N., 2001. "Scales of Governance and

- Environmental Justice for Adaptation and Mitigation of Climate Change”, *Journal of International development*, 13(7), 921-931.
19. Adger, W. N., 2003. “Social Aspects of Adaptive Capacity.” in *Climate Change, Adaptive Capacity and Development*, edited by Smith, J. B., Klein, R. J. T., Huq, S, 29-49. London: Imperial College Press.
 20. Adger, W. N., Arnell, N. W., and Tompkins, E. L., 2005. “Successful Adaptation to Climate Change across Scales”, *Global Environmental Change*, 15(2): 77-86.
 21. Anselin, L., 1988. *Spatial Econometrics: Methods and Models*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
 22. Anselin, L., 1995. “Local Indicators of Spatial Association-LISA”, *Geographical Analysis*, 27(2): 93-115.
 23. Araya-Muñoz, D., Metzger, M. J., Stuart, N., Wilson, A. M. W., and Alvarez, L., 2016. “Assessing Urban Adaptive Capacity to Climate Change”, *Journal of Environmental Management*, 183: 314-324.
 24. Aylett, A., 2015. “Institutionalizing the Urban Governance of Climate Change Adaptation: Results of an International Survey”, *Urban Climate*, 14: 4-16.
 25. Bass, J., 1998. “Evaluating Environmental Justice under the National Environmental Policy Act”, *Environmental Impact Assessment Review*, 18(1): 83-92.
 26. Bicknell, J., Dodman, D., and Satterthwaite, D., 2012. *Adapting Cities to Climate Change: Understanding and Addressing the Development Challenges*. London: Earthscan.
 27. Carter, J. G., 2018. “Urban Climate Change Adaptation: Exploring the Implications of Future Land Cover Scenarios”, *Cities*, 77: 73-80.
 28. Cheng, C., Yang, Y. E., Ryan, R., Yu, Q., and Brabec, E., 2017. “Assessing Climate Change-Induced Flooding Mitigation for Adaptation in Boston’s Charles River Watershed, USA”, *Landscape and Urban Planning*, 167: 25-36.
 29. Chu, E., Anguelovski, I., and Roberts, D., 2017. “Climate Adaptation as Strategic Urbanism: Assessing Opportunities and Uncertainties for Equity and Inclusive Development in Cities”, *Cities*, 60: 378-387.
 30. Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., and Webb, J., 2008. “A Place-Based Model for Understanding Community Resilience to Natural Disasters”, *Global Environmental Change*, 18(4): 598-606.
 31. Fotheringham, A. S., Brunson, C., and Charlton, M., 2000. *Quantitative Geography: Perspectives on Spatial Data Analysis*, London: Sage.
 32. Fouillet, A., Rey, G., Laurent, F., Pavillon, G., Bellec, S., Guihenneuc-Jouyau, C., and Hémon, D., 2006. “Excess Mortality Related to the August 2003 Heat Wave in France”, *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 80(1): 16-24.
 33. Füßel, H. M., and Klein, R. J., 2006. “Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking”, *Climatic Change*, 75(3): 301-329.
 34. Garssen, J., Harmsen, C., and Beer, J. D., 2005. “The Effect of the Summer 2003 Heat Wave on Mortality in the Netherlands”, *Eurosurveillance*, 10(7-9): 165-167.
 35. Grothmann, T. and Patt, A., 2005. “Adaptive Capacity and Human Cognition: The Process of Individual Adaptation to Climate Change”, *Global Environmental Change*, 15(3): 199-213.
 36. Hajat, S., Kovats, R. S., and Lachowycz, K., 2007. “Heat-Related and Cold-Related Deaths in England and Wales: Who Is at Risk?”, *Occupational and Environmental Medicine*, 64(2): 93-100.

37. Hamin, E. M., Gurrán, N., and Emlinger, A. M., 2014. "Barriers to Municipal Climate Adaptation: Examples from Coastal Massachusetts' Smaller Cities and Towns", *Journal of the American Planning Association*, 80(2): 110-122.
38. Hayhoe, K., Sheridan, S., Kalkstein, L., and Greene, S. 2010. "Climate Change, Heat Waves, and Mortality Projections for Chicago", *Journal of Great Lakes Research*, 36(SP2): 65-73.
39. Heinrichs, D., Krellenberg, K., and Fragkias, M., 2013. "Urban Responses to Climate Change: Theories and Governance Practice in Cities of the Global South", *International Journal of Urban and Regional Research*, 37(6): 1865-1878.
40. Huang, C., Barnett, A. G., Xu, Z., Chu, C., Wang, X., Turner, L. R., and Tong, S., 2013. "Managing the Health Effects of Temperature in Response to Climate Change: Challenges Ahead", *Environmental Health Perspectives*, 121(4): 415-419.
41. Ikeme, J., 2003. "Equity, Environmental Justice and Sustainability: Incomplete Approaches in Climate Change Politics", *Global Environmental Change*, 13(3): 195-206.
42. IPCC., 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report*, Geneva: IPCC.
43. Johnson, H., Kovats, R. S., McGregor, G., Stedman, J., Gibbs, M., Walton, H., and Black, E., 2005. "The Impact of the 2003 Heat Wave on Mortality and Hospital Admissions in England", *Health Statistics Quarterly*, 25: 6-11.
44. Kelly, P. M., and Adger, W. N., 2000. "Theory and Practice in Assessing Vulnerability to Climate Change and Facilitating Adaptation", *Climatic Change*, 47(4): 325-352.
45. Kithiia, J., and Dowling, R., 2010. "An Integrated City-Level Planning Process to Address the Impacts of Climate Change in Kenya: The Case of Mombasa", *Cities*, 27(6): 466-475.
46. Klinenberg, E., 2003. "Review of Heat Wave: Social Autopsy of Disaster in Chicago", *New England Journal of Medicine*, 348(7): 666-667.
47. Lim, B., Spanger-Siegfried, E., Burton, I., Malone, E., and Huq, S., 2005. *Adaptation Policy Framework for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures*, Cambridge: UNDP/Cambridge University Press.
48. Michelozzi, P., De Donato, F., Bisanti, L., Russo, A., Cadum, E., and DeMaria, M., 2005. "The Impact of the Summer 2003 Heat Waves on Mortality in Four Italian Cities", *Eurosurveillance*, 10: 161-165.
49. Moss, R. H., Brenkert, A. L., and Malone, E. L., 2001. "Vulnerability to Climate Change: A Quantitative Approach," Technical Report PNNL-SA-33642 prepared by the Pacific Northwest National Laboratory for the Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, Oak Ridge, TN, USA and U.S. Department of Commerce, Springfield, VA, USA.
50. Norman, B., 2009. "Principles for an Intergovernmental Agreement for Coastal Planning and Climate Change in Australia", *Habitat International*, 33(3): 293-299.
51. Smit, B. and Wandel, J., 2006. "Adaptation, Adaptive Capacity and Vulnerability", *Global Environmental Change*, 16(3): 282-292.
52. Smit, B. and Pilifosova, O., 2001. "Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development and Equity." in *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, edited by McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., and White, K. S. Cambridge: Cambridge University Press.
53. Solomon, S., Plattner, G. K., Knutti, R., and Friedlingstein, P., 2009. "Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions",

- Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6): 1704-1709.
54. Sternberg, E., 2003. "Planning for Resilience in Hospital Internal Disaster", *Prehospital and Disaster Medicine*, 18(4): 291-299.
55. Tompkins, E. and Adger, W. N., 2004. "Does Adaptive Management of Natural Resources Enhance Resilience to Climate Change?", *Ecology and Society*, 9(2): 1-10.
56. Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., and Polsky, C., 2003. "A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14): 8074-8079.
57. Wilbanks, T. J., 2003. "Integrating Climate Change and Sustainable Development in a Place-Based Context", *Climate Policy*, 3(1): S147-S154.
58. Wolf, T., and McGregor, G., 2013. "The Development of a Heat Wave Vulnerability Index for London, United Kingdom", *Weather and Climate Extremes*, 1: 59-68.

Date Received 2018-03-30
 Reviewed(1st) 2018-05-21
 Date Revised 2018-08-27
 Reviewed(2nd) 2018-09-07
 Date Revised 2018-11-09
 Reviewed(3rd) 2018-11-16
 Date Accepted 2018-11-16
 Final Received 2018-11-20