

A System Dynamics Analysis of Urban Heat Waves

Yu Mi Kim^{1#}, Yong Un Ban¹⁺, Hye Rim Choi¹, Nam Hee Choi²

¹ Department of Urban Engineering, Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, Korea

² The Public Management Information System at Korea National University of Transportation, Daehak-ro 50, Daesowon-myeon, Chungju, Korea

Abstract

In this study, we analyzed the potential determinants of urban heat waves in Korea and their dynamic relationship using a system dynamics analysis approach. We developed an integrated causal loop diagram and identified the direct and indirect factors influencing urban heat waves. The followings are the main findings of this study. First, the rise of temperature in Korea is not simply due to the increase of impervious areas affected by urbanization but should be seriously recognized as a critical issue of heat waves which may lead to the annihilation of the areas. Second, for more accurate prediction of the temperature increase and development of effective policy responses, we need a new approach that focuses on a non-linear and dynamic relationship between urban heat wave process and urban safety. Third, it is critical to explore policy measures for maintaining socioeconomic conditions and improving the level of urban safety based on the multi-dimensional examination of causal relationships across various determinants for urban heat waves in South Korea.

Key words: urban heat wave, Urbanism, system thinking, causal loop

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

세계 곳곳에서 때 아닌 폭염, 한파, 홍수, 폭설, 가뭄 등 이상기후 현상이 지속적으로 일어나고 있다(Korea Meteorological Administration, 2012). 이상기후는 생태계, 수자원, 식량자원, 해안, 건강 등 다양한 분야에서 재산 및 인명피해를 유발하고, 향후 그 피해는 더욱 커질 전망이다(IPCC, 2007). Chae, *et al.*(2017)의 연구 결과, 화석연료 위주의 경제 지속(SSP3 시나리오) 및

온실가스 배출량 최고치를 유지할 경우(RCP8.5 시나리오) 2100년에는 GDP 기준 약 5.22%의 기후변화로 인한 피해비용이 발생하며 이는 매해 약 94조 원에 달할 것으로 분석하였다.

이 중 폭염은 기후변화가 진행됨에 따라 피해가 가장 많이 증가될 것으로 우려되는 기상재해 중 하나이다(Kim, *et al.*, 2014). Forzieri, *et al.*(2017)은 유럽에서 2071년~2100년에 열로 사망할 인구수는 1981년~2010년과 비교하여 50배가 넘을 것으로 예측되며 21세기 말까지 기후변화로 인한 재난 사망자 수의 99%를 차

The 1st author: Yu Mi Kim, Tel. +82-43-273-3391, Fax. +82-43-273-3393, e-mail. printand@nate.com

+ Corresponding author: Yong Un Ban, Tel. +82-43-261-3391, e-mail. byubyu@cbu.ac.kr

지할 것이라고 하였다. 과거에도 폭염은 많은 사상자를 발생시켰다. 미국 시카고에서는 1995년 7월 4명이 열로 인해 사망한 이틀 뒤 사망자가 181명으로 급증하였고 총 514명이 사망하였다(Whitman, *et. al.*, 1997). 프랑스에서는 2003년 8월 4일~8월 18일 약 2주 동안 14,947명이 사망하였다(Assemblée Nationale, 2004). 이러한 경향은 21세기에 대부분의 육상지역에서 지속될 것으로 예측되고 있다(Kim, *et. al.*, 2009). 2018년에 우리나라에서 발생한 폭염은 1994년 폭염기록을 뛰어넘었다.

이러한 극단적 폭염의 강도와 빈도는 더욱 증가할 것으로 보고되고 있다(Lee, *et. al.*, 2010). 기후와 관련한 국제기구들의 연구들은 21세기 폭염은 빈도, 강도, 지속기간 모두가 증가할 것이라는 결과를 내놓고 있다(IPCC SRES, 2012; IPCC WG2 4th Assessment report, 2007; WHO Health and Global Environmental Change report, 2003; Meehl, 2004). 전 세계적 추세와 우리나라의 기록적 폭염 경험에 근거하여 적절한 대응 방법이 필요한 시기이다. Lee, *et. al.*(2009)에 따르면 “기후변화 등으로 인해 폭염이 지금보다 장기적으로 발생할 가능성이 높은 것을 고려할 때 폭염 지속일수가 더욱 증가할 경우 인명피해에 대비할 수 있는 장기적 대책 마련이 시급한 상황”이라고 하였다. 본 연구에서는 먼저 도시 폭염 현상의 위험성을 살펴보고, 시스템사고(Systems Thinking)를 통해 도시폭염 현상을 초래하는 요인들과 이러한 요인들이 어떠한 인과순환적 상호작용을 통해 폭염을 증폭시키는가를 통합적으로 탐색해보고자 하였다. 또한 이 연구에서는 도시폭염이 증폭되지 않도록 대응하기 위한 정책들이 효과적으로 작동될 수 있도록 대응하기 위한 구조를 검토해 보고자 하였다.

II. 이론적 고찰

1. 도시 폭염

IPCC는 제5차 기후변화 종합보고서 지구 표면 온도는 지속적으로 상승할 것이며 다수의 지역에서 폭염이

나 강수의 발생 빈도 및 강도가 증가할 것이라고 예측하고 있다(IPCC, 2014). 우리나라는 사계절이 뚜렷한 나라로 시기별로 각기 다른 자연재해가 발생한다. 우리나라는 자연재해로 인하여 최근 10년(2007~2016)동안 162명의 인명피해와 더불어 약 6조 3천억 원의 재산피해를 입었다(Ministry of the Interior and Safety, 2017). 우리나라에서 여러 가지 자연재해 중 연간 사망자 순위가 가장 높은 것은 1994년 3,384명을 기록한 폭염이다.

폭염은 “일정 온도 이상 기온이 상승했을 때 인명 및 재산피해를 유발시키는 재해(Lee, *et. al.*, 2015)로 정의된다. 폭염은 열탈진, 열사병, 열경련 등 온열질환을 유발하고, 불쾌한 환경 조성은 경제활동 저해 및 도로 및 철로 등의 인프라 피해 등을 유발시켜 사회 부담을 가중시킨다. 우리나라 최근 30년 기온은 20세기 초(1912~1941)보다 1.4℃ 상승하였다(National Institute of Meteorological Sciences, 2018). 2018년에는 기상관측 이래로 가장 높은 온도인 41℃(2018년 8월 1일, 강원도 홍천)까지 치솟았다. 폭염일수는 31.4일로 평년값 9.8일의 세배를 넘었고 열대야일수 또한 17.7일로 가장 많았으며 여름철 평균기온 역시 역대 1위에 올랐다.

Kwon(2018)은 폭염은 기본적으로 계절적 요인에 의해 자연적으로 발생하지만 도시열섬현상, 기후변화 등 인간 활동의 영향으로 인해 인위적으로 더욱더 가중될 수 있다고 하였다. 이 중 “도시 외곽지역의 온도보다 도시 중심의 온도가 상대적으로 높은 현상”(Li, *et. al.*, 2019)을 의미하는 도시 열섬현상(Urban Heat Island)은 도시의 특성과 직결되는 현상이다. 도시의 대표적인 특성은 불투수면이 높은 것이고 불투수면을 조성하는 재료인 아스팔트 및 콘크리트가 지표면을 덮게 되면 지표면의 열 특성과 반사도에 영향을 미쳐 도시의 온도가 상승하게 된다(Li, *et. al.*, 2019). 또한 고층건물이 밀집하여 도시의 대류 현상을 저해하고(Hu, *et. al.*, 2016), 도시 중심지의 경제·사회 활동으로 인한 상대적 녹지 감소는 도시의 인공적인 온도 상

Table 1. Social burden type of heat wave

Categories	Contents
Personal Health Safety Threats	<ul style="list-style-type: none"> • Delayed emergency response due to rapid skin aging, heat cramps, heat stroke, heat fatigue, cooling sickness, insomnia, increased fatigue and exhaustion • Hepatitis C group infection, increased encephalitis, cholera, food poisoning, etc. • Decreased physical activity and deteriorated mental health due to reduced external activity, lack of comfortable sleep, and reduced social activities
Environmental changes due to temperature rise	<ul style="list-style-type: none"> • Air quality effects such as changes in pollutant concentration and ozone concentration • Soaring damages to agriculture, livestock and fisheries, such as livestock, farmed fish and shellfish, and agricultural land drought • Increased forest mortality, including roadside trees and afforestation • Water system disturbance caused by algae
Socio-economic downturn	<ul style="list-style-type: none"> • Power failure due to increased energy consumption • Possible to delay traffic and transportation facility operation and accidents such as road surface damage, railway buckling phenomenon, underground line breakdown • Contraction of government, construction and manufacturing

※Source: Yuk, *et. al.*(2018)

승을 촉진한다(Maheng, *et. al.*, 2019).

Kwon(2018)에 의하면 폭염 저감 기법은 크게 5가지가 있다. 첫 번째 기법은 순복사량을 최적화하는 지표면 조성 및 그늘을 조성하는 식재이다. 두 번째 기법은 증발 잠열량 증대를 목적으로 옥상조경, 수경시설을 설치하는 것이다. 세 번째 기법은 축열량 저감을 목적으로 저열용량 소재를 사용하는 방식이며, 네 번째 기법은 소비열 저감을 위해 에너지 절약형 건축기법을 적용하는 것이다. 마지막으로 다섯 번째 유형은 공간 외부 수평이류 촉진을 목적으로 바람길 유지 및 조성하는 것이다.

2. 폭염과 경제·사회·환경적 피해

장기간 고온에 노출될 경우 건강에 대한 위협과 더불어 경제 및 사회활동 침체를 초래하게 된다. 우리나라의 경우 비교적 폭염 일수가 작았던 온대몬순 기후대에서 폭염 최대의 취약지로 변화하면서 과거와는 다른 폭염 발생 패턴으로 인한 적용에 큰 어려움이 예상된다(Yuk, *et. al.*, 2018¹⁾). Yuk, *et. al.*(2018)이 제시한 폭염에 의한 사회적 부담 유형은 크게 개인 건강안전 위협, 기온상승으로 인한 환경변화, 사회·경제 침체 등으로 구분된다.

3. 선행연구 검토

Kwon(2018)은 인간 활동의 영향으로 인해 폭염이 심화될 수 있다고 하였는데 인구가 집중되고 각종 활동이 복합적으로 이루어지는 도시에서 폭염 피해가 중 원인과 피해가 집중되어있다고 할 수 있다. 도시가 비도시지역에 비해 폭염의 피해가 가중되는 원인은 불투수지역의 증가, 도시 인공열 발생시설의 증가, 도시 규모의 증가 등으로 구분할 수 있다. 먼저 도시의 불투수지역은 농촌이나 산림지역과 가장 뚜렷한 차이를 보인다. 불투수지역은 투수지역보다 형성되는 온도가 높다(Kim, *et. al.*, 2016; Kim & Yeom, 2012). Kim, *et. al.*(2016)은 폭염 증발냉각시스템 적용을 위해 토지 피복유형별 기상현황을 측정된 결과 “일평균 기온의 경우 불투수포장지 유형은 37.5℃, 초지 유형은 37.3℃, 초지 및 식재혼합지는 32.0℃”로 각각 온도 차이가 있으며 이 중 불투수포장지의 온도가 가장 높은 것으로 측정되었다. Kim & Yeom(2012)의 연구에서는 인공위성 영상자료를 활용하여 지표면 온도를 분석한 결과 “건폐율이 낮고 녹지율이 높은 고층 아파트 단지가 건폐율이 높고 녹지율이 낮은 단독주택단지보다 도시지표면온도에 의한 열섬 효과가 적은 것”을 확인하였다. 또한 녹지지역(산림지역 및 호수지역 일대)과 선형 녹지가 조성된 지역의 지표면 온도가 두드러지

1) 폭염 그리고 지역의 대응 (2018.8.21.) 제 706호 강원연구원

게 낮은 것으로 나타났다. Choi, *et. al.*(2010)은 도심의 거칠기(urban roughness)가 기상장(atmospheric flow field)에 영향을 미치는데 예를 들어 산지를 불투수면으로 조성된 평지로 조성 및 지표 구조물을 설치하여 도시의 거칠기가 낮아질 경우 도시의 환기 능력을 저해할 수도 있다고 하였다.

인공열은 다양한 토지이용에 따른 연소과정, 예를 들자면, 교통, 가열과 냉각, 전기의 사용 등에 의해서 도시환경으로 방출된다(Lee, 2017). 인구가 많은 대도시지역은 산업과 교통이 밀집해 있고, 대규모 냉난방 시설 등으로 인한 인공열의 방출이 많아 도시 열섬현상을 악화시킨다(Lee, *et. al.*, 2010). Yoo, *et. al.*(2017)이 대구지역 열환경을 분석한 결과 낮의 경우 공업지역 지표면온도가 가장 높게 나타나고 밤의 경우 주거지역과 상업지역 온도가 높게 나타나는 것을 밝혔는데, 이는 인공열을 배출하는 공업단지의 생산설비 가동이 주로 낮 시간에 이루어지기 때문이며 밤에 공장 가동이 멈추고 주거단지 및 상업단지로 Hot Spot이 바뀌기 때문으로 해석하였다.

또한 도시의 성장 과정은 부득이하게 폭염을 가중시켰다(Kwon, 2018). Kwon(2018)은 지역 고유의 기상여건이 충분히 반영되지 못한 도시구조로 인해 폭염이 인위적으로 가중될 수 있음을 대구시와 주변지역 연구를 통해 주장하였다. Hong & Lee(2011)는 우리나라 대표 도시인 서울시의 외연적 확산과 동시에 외곽지역으로 도시화가 진행되는 현상을 통해 도시의 성장패턴이 공간구조의 확산으로 나타난다는 분석을 하였다. 대부분의 도시화는 녹지 지역의 파괴를 통해서 이루어지고 있다(Park & Choi, 2016). 이를 통해 “도시의 규모가 클수록 열섬의 영향이 커지는 경향이 있다”(Jung & Yun, 2017)는 것을 유추할 수 있다. 자연적인 도시 성장은 교외화와 탈도시화를 겪으면서 외연적 확산을 이루는데, 이러한 도시의 확산은 더 많은 인구유입과 일자

리, 인프라를 보유하게 되는 도시 집중 현상을 야기한다. 그리고 이러한 변화는 지표면 온도 변화에 영향을 주며 도시의 내·외연적 성장은 도시 온도와 필연적 관계가 있음을 시사한다(An, *et. al.*, 2016).

폭염은 사망, 온열질환 입원, 체내 탈수 등 건강악화와 사망증가에 영향을 미치며(Lim, 2019; Lee, *et. al.*, 2014) 고온 노출은 세로토닌 변화는 정신착란(Kim, 2019) 또는 자살까지 이어진다(Kim, *et. al.*, 2016). Lee, *et. al.*(2014)은 폭염으로 인한 사망률을 분석한 결과 취약계층의 사망률, 특히 소득이 없는 노인의 비율, 독거노인의 비율이 높을수록 폭염과 같은 이상기후에 대해 취약한 것을 밝혔다.

폭염은 사회기반시설에도 영향을 미친다. 포장도로가 고온에 솟아오르는 블로우 업(Blow-up) 현상은 2018년 폭염으로 인한 대표적인 피해사례이다. 2018년 고속도로에서만 발생한 블로우업 피해는 8건에 달하며, “고속도로뿐 아니라 전체 국도까지 살펴보면 사태가 더 심각할 것으로 예상”²⁾된다. 성남시에서는 폭염으로 인한 아스콘 팽창 등의 원인으로 상수도배관 파열 및 교각 균열 사고가 발생하였다³⁾. 또 폭염은 냉방 에너지 수요 급증으로 인한 정전 발생을 유발한다. 이와 같이 폭염은 도시 인프라에 열 스트레스를 높인다. 국립환경과학원에서 2018년 폭염경보 주간에 열 스트레스를 분석한 결과 그레이 인프라, 즉 상업지구, 나지, 고층아파트, 단독주택단지, 야외주차장 등의 스트레스가 높게 나타났다.⁴⁾

이러한 폭염은 다양한 기후변화 현상 중 폭염은 초과 사망을 유발하는 가장 위험한 요소(EEA, 2011)인데 이로 인한 초과 사망은 기후변화로 인한 가장 높은 사회적 비용을 유발한다(Watkiss, *et. al.*, 2009).

내용을 종합하여 보면 폭염은 건강에 심각한 피해, 특히 취약계층의 사망 및 질병 발생에 영향을 준다. 또 도시의 인프라가 고온에 장기적으로 노출되면서

2) 2018년 한국도로공사 국정감사자료(박재호 의원, 더불어민주당)

3) “배관 터진 성남 야탑10교 교량 긴급복구 조치”. 비전성남, 2018-07-31

4) “올해 폭염, 산림 제외 모든 인프라에서 열스트레스 높아”, 환경부·국립환경과학원 보도자료, 2018-9-10.

노후화 및 파손을 입게 되면, 연쇄적으로 다른 인프라에 영향을 미치며 최종적으로 인간의 건강에 피해를 입히게 된다. 즉, 폭염은 인체위해의 직접피해와 도시 인프라 등 1차 산업에 부정적인 영향을 통한 재산피해와 질병, 전염병 등의 발병 가능성 증대의 보건위험 증대 그리고 불쾌지수, 생체리듬 상실 등의 간접 피해를 준다(Shin, 2015).

폭염의 해결방안은 분야별, 지자체별 다양하게 내놓고 있지만 영역에 따른 해결책 보다는 통합적 관점의 정책을 내놓는 추세이다. 안전도시서울플랜의 경우 “정책환경 변화로 시설물분야 외 다양한 안전이슈가 사회 문제화, 안전사고의 중요성에 대한 시민 공무원 간 인식격차 발생, 현장 여건 고려없는 안전관련 법령, 제도 등으로 동일 사고 반복 발생, 안전 이슈가 국경을 넘어 발생하여 해외도시간 협치 필요”함에 따라 “사회·경제적 변화 대응으로 사회·인문학적 관점에서 안전 패러다임 재정립” 하고 있다.

III. 도시 폭염의 인과구조 분석

본 논문은 우리나라 도시 폭염의 특성과 그 원인을 분석하고 설명하는데 있는바 앞에서는 우리나라 폭염이 급속히 진행될 가능성이 있음을 확인할 수 있었다. 여기에서는 우리나라에서 매년 피해가 증가하는 도시 폭염의 동태성과 그 원인에 대한 인과순환적 피드백 구조분석을 실시하였다.

이와 관련하여 이 논문에서는 도시 폭염이 기후변화와 도시화가 상호작용하는 구조에 의해 초래된다고 보고 두 가지 현상과 관련되어 있는 요인들이 어떠한 인과순환적 관계를 가지고 있는가를 선행연구 등을 통해 검토하였다.

1. 도시 폭염의 요인과 특성의 구조 검토

앞에서 검토한 바와 같이 도시 폭염의 실태 등에 관한 선행연구에 따르면 도시 폭염의 요인은 도시의 불투수면적의 증가, 도시의 경제사회적 여건 쇠퇴, 도

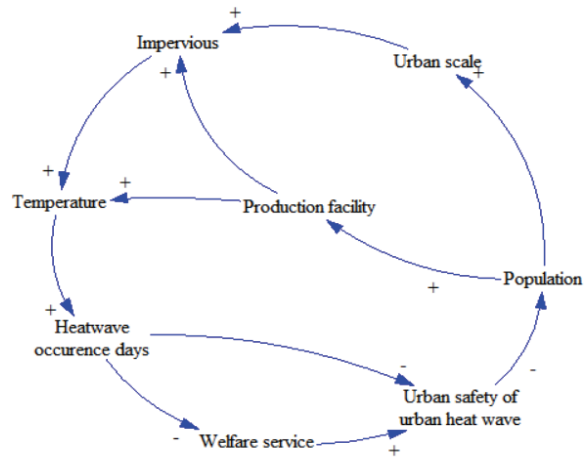


Figure 1. Acceleration feedback structure for urban heat waves

시의 활동과 기능의 정도(안전성, 복지 서비스), 그리고 인구의 이동 등으로 요약할 수 있다.

이러한 요인들 중에 궁극적으로 우리나라의 도시 지역에서 도시 안전성을 저해하는 도시 폭염 과정에서 나타나게 되는 것은 <Figure 1>과 같이 도시 온도의 임계점을 지나면서 나타나는 도시 온도의 급격한 증가와 도시화, 과밀밀화에 따른 교외로의 인구유출이 일반적인 구조라고 할 수 있다.

특히 일반적인 의미에서의 도시 안전성 감소와는 달리 도시 불투수면적 증가 과정에서 인구 증가와 도시의 여러 가지 사회경제적 영향과 이로 인하여 도시의 기능 쇠퇴가 복합적인 영향으로 나타나는 인구 감소는 도시 안전성에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 또한, 도시 쇠퇴지역과 같이 사회경제적 여건이 저하되는 곳은 폭염이 계속되어 진행되면 도시를

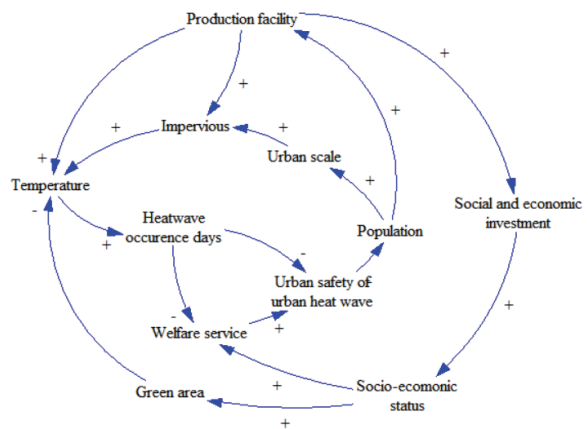


Figure 2. Basic feedback on the causes of urban heat waves

구성하는 요인들이 악순환의 구조를 초래하여 결국에는 비선형적으로 도시 쇠퇴를 초래하여 지역이 소멸하게 되는 것이다.

<Figure 2>는 이러한 인과관계를 바탕으로 도시 폭염의 원인을 <Figure 1>보다 구체적으로 표현하였다. 여기에서 양의 피드백 루프 1은 인구의 감소가 지속되고 한편으로는 인구 유출이 늘어나 지역이 쇠퇴하고 발전 저해에 따른 폭염 재정 투가 감소로 도시 온도 증가가 가속화되는 피드백 구조이다.

한편 <Figure 3>은 앞에서 기본적인 인구구조 위에 앞에서 검토되었던 도시 폭염의 여러 가지 요인들과 불투수면적 증가 등의 모든 공간적, 시간적 요인들을 고려하여 도시화에서 일어나는 도시 폭염의 인과관계를 피드백 구조로 표현하였다.

<Figure 3>의 통합인과지도에서 우리나라 도시 폭염을 초래하는 중요한 요인들로는 기후변화로 인한 고온현상, 일조시간 등과 더불어 도시화로 인한 불투수면적 증가와 녹지면적의 감소로 발생하는 열섬현상

등을 들 수 있다. 이러한 관계 중 도시의 경제·사회 활동에 따라 도시화면적이 증가하거나 감소하고 따라서 도시 온도에 간접적으로 영향을 주며, 도시활동 자체로 열이 발생하여(예. 냉방기구, 자동차, 공장 등의 열 발생) 외부 온도 상승에 직접적으로 영향을 미친다. 그러나 폭염 대응정책을 계획하고 수행할 때에는 도시의 재정 상황이 크게 좌우할 수 있다. 또한 도시의 인구는 규모가 커질수록 도시화 면적은 증가하지만 도시의 경제·사회 활동 즉 폭염대응 정책을 수행할 수 있는 재정 상황에 영향을 준다. 따라서 폭염은 기후 변화와 도시 경제·사회 활동의 결합으로 발생하지만 도시의 활동이 적절히 뒷받침 되어야 필연적으로 다가오는 기후변화 영향을 최소화할 수 있을 것이다.

이를 종합하여 본 논문에서 <Figure 3>의 인과지도를 통해 주장하고자 하는 내용은 다음과 같다.

첫째, 우리나라의 도시의 온도 증가는 불투수면적 증가에 의해 진행되는 단순한 의미의 도시화가 아니라 지역의 경제·사회·환경 역량 차원에서 빠른 대

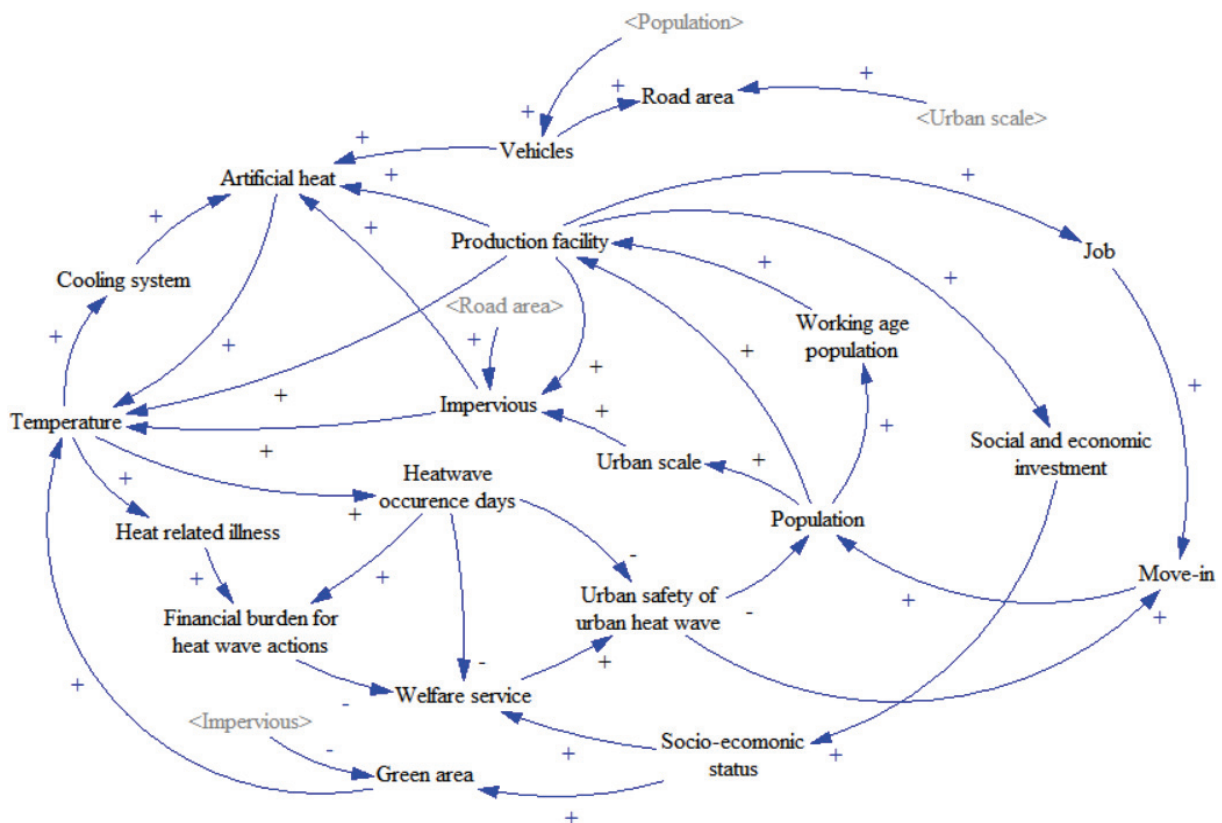


Figure 3. Urban heat wave integrated causal map

응이 필요하다는 점이다.

둘째, 장래의 도시 폭염이나 온도 증가를 예측 및 전망하는데 있어 전통적인 접근 시각들이 회귀분석 등을 주로 고려하거나 선형적인 요소별 추이를 가정하는 것은 도시 폭염의 명확한 인과관계를 설명하기 어려우며, 폭염을 통해 발생하는 피해 예측을 어렵게 한다. 따라서 우리나라 도시의 온도 증가를 보다 정확하게 예측하고 설득력 있는 정책방안을 제안하기 위해서는 도시 폭염 과정과 도시 안전성이 매우 비선형적·동태적으로 초래된다는 새로운 접근시각이 필요하다.

셋째, 우리나라의 도시화 과정에서는 도시화와 불투수면적 증가가 결합되어 도시의 공간구조는 물론 예상하지 못한 시점에 도시 안전성이 저하되는 등 매우 위험한 결과를 초래할 수 있다. 그래서 도시라는 한정된 공간에서 폭염을 유발하는 다양한 요인들 간의 인과관계를 검토하고 도시의 사회경제적 여건을 안전하게 유지할지에 대한 도시 안전 서비스 수준개선 방안을 모색해 보아야만 한다는 것이다.

IV. 결론

우리나라의 경제발전과 도시화는 전 세계적으로 손꼽을 정도로 매우 빠르고, 동태적이다. 그럼에도 불구하고 도시화 과정에 대한 영향 파악과 대응 수준은 도시 변화에 따른 기후변화의 과급 영향이 초래할지 알지 못하는 위험한 상황이다.

특히, 도시의 온도 변화를 예측하는 데 있어 일차원적인 접근 방법에 머물러 근시안적 대응 방안으로 우리나라의 폭염에 대응할 수 있을 것이라고 안심하는 실수를 범하고 있다. 그러나 도시 폭염에 영향을 미치는 요인들을 탐색하고 그 요인들 간의 중요한 인과순환적 관계를 탐색하여 정확한 원인과, 정책 실행 등으로 인한 상황 예측 등을 통해 더욱 안전한 도시를 구축할 수 있는 동태적 접근 시각이 필요한 것이다.

이 논문에서는 우리나라의 도시 폭염 과정을 올바르게 인식하기 위해서는 전국 차원의 분석도 중요하나,

다양한 사회경제적 시스템이 집중되어 있는 도시지역의 폭염 진행 과정을 시스템 사고에 입각하여 그 대응책을 발굴해야 한다는 것을 주장한다.

또한, 이 논문에서는 우리나라 도시 폭염의 진행 과정 속에서 도시 지역은 도시의 경제적 발전 등에 따른 도시화, 예비 인구의 전입, 도시의 경제·사회적 여건 및 복지 서비스의 수준 쇠퇴, 그리고 유소년 및 생산가능인구의 유출이 결합되어 도시 폭염에 영향을 미치고 그 수준이 임계치를 넘어설 경우 모든 경제사회적 기능이 쇠퇴하고 짧은 시간에 도시 안전성이 하락하여 도시가 소멸하는 이른바 경제와 환경 사이의 딜레마에 빠질 수 있다는 의견을 제시하였다. 또한 중앙 정부 및 지자체들의 적극적인 도시 폭염 대응 정책을 마련하지 못할 경우 도시가 자연적으로 도태될 수 있다는 것을 주장하고 있다.

한편, 이 논문의 한계를 보완하기 위하여 후속 연구로 도시화와 폭염에 따른 경제·사회·환경적 변화를 예측함과 동시에 정책 지표의 효과를 검증하는 시뮬레이션 모델 개발이 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

1. 이 논문은 2016년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2016S1A5B6914198).
2. 이 논문은 2017학년도 충북대학교 연구년제 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- An, Seung Man, Seung Jong Kim, and Hyeong Chan Lee. 2016. A Study on the Urban Area Microclimate Management Direction. KRIHS.
- Assemblée Nationale. 2004. Rapport de la commission d'enquête sur les conséquences sanitaires et sociales de la canicule. 1 and 2(1455). March 3, 2004.
- Chae, Yeo Ra, Joo Hyung Lee, and Chris Hope. 2017. Economic

- Analysis of Climate Change Damage in Korea Using SSP-RCP Scenario Matrix. Korea Environment Institute. 2017: 1-170.
- Choi, Hyun Jung, Hwa Woon Lee, Min Jung Kim. 2010. The Effect of Atmospheric Flow Field According to the Urban Roughness Parameter and the Future Development Plan on Urban Area. *Journal of The Korean Environmental Sciences Society*. 19(6): 703-714.
- EEA. 2011. The European Environment: State and Outlook 2010: Air Pollution Publications Office of the European Union. European Environment Agency.
- Forzieri, Giovanni, Cescatti Alessandro, Batista e Silva Filipe, and Feyen Luc. 2017. Increasing Risk Over Time of Weather-related Hazards to the European Population: A Data-driven Prognostic Study. *The Lancet Planetary Health*. 1(5): e200-e208.
- Hong, Nam Hee and Myeong Hun Lee. 2011. A Study on the Characteristics of Urban Spatial Structure Change of Seoul on the Sustainable Development. *Journal of Korea Planning Association*. 46(1): 39-50.
- Hu, Y., M. White, and W. Ding. 2016. An Urban Form Experiment on Urban Heat Island Effect in High Density Area. *Procedia Engineering*. 169: 166-174.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. PP: 151.
- Kim, Do Woo, Jae Hak Chung, Jong Seol Lee, and Ji Sun Lee. 2014. Characteristics of Heat wave Mortality in Korea. *Atmosphere. Korean Meteorological Society*. 24(2): 225-234.
- Kim, Hyun Ok and Jong Min Yeom. 2012. Effect of the Urban Land Cover Types on the Surface Temperature: Case Study of Ilsan New City. *Korean Journal of Remote Sensing*. 28(2): 203-214.
- Kim, Jeong Ho, Hak Gi Kim, Yong Han Yoon, and Ki Uk Kwon. 2016. Thermal Environment Transition of Response Climate Change and Heat Wave Application Evaporative Cooling System. *Journal of Environmental Science International*. 25(9): 1269-1281.
- Kim, Ji Young, Dae Geun Lee, and Jan Kysely. 2009. Characteristics of Heat Acclimatization for Major Korean Cities. *Atmosphere*. 19(4): 309-318.
- Kim, Ki Ho. 2019. Heat-related skin disease. *Journal of the Korean Medical Association*. 62(4): 187-192.
- Kim, Y., H. Kim, Y. Honda, Y. L. Guo, B. Y. Chen, J. M. Woo, and K. L. Ebi. 2015. Suicide and Ambient Temperature in East Asian Countries: a Time-stratified Case-crossover Analysis. *Environmental Health Perspectives*. 124(1): 75-80.
- Kwon, Yong Suk. 2018. Estimation and Countermeasure of the Heat Wave Cause of Daegu Metropolitan Basin from the Urban Structural Dimension. *The Korea Spatial Planning Review*. 98: 23-35.
- Lee, Dae Geun, Jae Young Byon, Young Jean Choi, and Kyu Rang Kim. 2010. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 1(2): 109-120.
- Lee, Gun Won. 2017. Relationship between Urban Environment and Local Temperature for Managing Urban Heat Island Effect in Neighborhood. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 18(10): 806-816.
- Lee, Na Young, Yong Sung Cho, and Jae Young Lim. 2014. Effect of Climate Change on Mortality Rate Analysis of Vulnerable Populations. *Health and Social Welfare Review*. 34(1): 456-484.
- Li, Yige, Su Gie Lee, and Jae Won Han. 2019. Analysis of the Relationship Between Three-Dimensional Built Environment and Urban Surface Temperature. *Journal of Korea Planning Association*. 54(2): 93-108.
- Lim, Y. H. 2019. The Health Effects of Heat Waves. *Health and Welfare Policy Forum*. 269: 7-19.
- Maheng, D., I. Ducton, D. Lauwaet, C. Zevenbergen, and A. Pathirana. 2019. The Sensitivity of Urban Heat Island to Urban Green Space: A Model-Based Study of City of Colombo, Sri Lanka. *Atmosphere*. 10(3): 151.
- Park, Sam and Gwang Yong Choi. 2016. Urban Sprawl in the Seoul Metropolitan Region, Korea Since the 1980s Observed in Satellite Imagery. *Journal of the Association of Korean Geographers*. 5(3): 331-343.
- Shin, Dong Hee, Na Young Lee, Yong Sung Cho. 2015. Analyzing Mortality Rate and Social Costs of Climate Vulnerable Groups

- caused by Heat Waves in Korea. *Journal of Environmental Policy*. 14(1): 3-32.
- Watkiss, P., L. Horrocks, S. Pye, A. Searl, and A. Hunt. 2009. Impacts of Climate Change in Human Health in Europe. PESETA-Human Health Study. European Commission, Institute for Prospective Technological Studies. Luxembourg: Office for Official Publications of the Europe Communities.
- Whitman, Steven, Glenn Good, Donoghue, R. Edmund, Benbow Nanette, Shou Wenyuan, and Mou Shanwuan. 1997. Mortality in Chicago Attributed to the July 1995 Heat Wave. *American Journal of Public Health*. 87(9): 1515-1518.
- Yoo, Cheol Hee, Jung Ho Im, Seon Young Park, and Dong Jin Cho. 2017. Thermal Characteristics of Daegu using Land Cover Data and Satellite-derived Surface Temperature Downscaled Based on Machine Learning. *Korean Journal of Remote Sensing*. 33(6-2): 1101-1118.
- Jung, Eun Ju and Hee Cheol Yun. 2017. A Study on Citizens Consciousness and Policy for UHI Phenomenon: Case of Gwangju Metropolitan City. *The Studies in Regional Development(SRD)*. 49(1): 87-110.
- Korean References Translated from the English*
- Li, Yige, 이수기, 한재원. 2019. 도시의 3차원 물리적 환경변수와 지표온도의 관계 분석. *국토계획*. 54(2): 93-108.
- 국립기상과학원. 2018. 한반도 100년이 기후변화.
- 권용석. 2018. 도시구조적 차원에서 바라본 대구 대도시 유역의 폭염 가중원인 추정과 해결과제. *국토연구*. 98: 23-35.
- 김기호. 2019. 열에 의한 피부질환. *대한의사협회지*. 62(4): 187-192.
- 김도우, 정재학, 이종철, 이지선. 2014. 우리나라 폭염 인명피해 발생특징. *한국기상학회 대기*. 24(2): 225-234.
- 김정호, 김학기, 윤용한, 권기욱. 2016. 기후변화 및 폭염대응 증발냉각시스템 적용에 따른 내·외부 열환경 변화 연구. *한국환경과학회지*. 25(9): 1269-1281.
- 김지영, 이대근, Jan Kysely. 2009. 한국 주요도시의 폭염에 대한 기후 순응도 특성. *한국기상학회*. 19(4): 309-318.
- 김현욱, 염종민. 2012. 도시지역의 토지피복유형이 지표면온도에 미치는 영향: 경기도 일산 신도시를 중심으로. *대한원격탐사학회지*. 28(2): 203-214.
- 박섭, 최광용. 2016. 위성영상에 탐지된 1980년대 이후 수도권 지역의 도시 팽창. *한국지리학회지*. 5(3): 331-343.
- 신동희, 이나영, 조용성. 2015. 폭염 발생에 따른 취약계층의 사망률 변화와 사회적 비용 추정: 7대 광역시의 65세 이상 고령층을 중심으로. *환경정책연구*. 14(1): 3-32.
- 안승만, 김승중, 이형찬. 2016. 도시지역 미기후 관리방향 연구. 국토연구원.
- 유철희, 임정호, 박선영, 조동진. 2017. 기계학습 기반 상세계화를 통한 위성 지표면온도와 환경부 토지피복도를 이용한 열환경 분석: 대구광역시를 중심으로. *대한원격탐사학회지*. 33(6): 1101-1118.
- 이건원. 2017. 근린단위의 도시열섬관리를 위한 국지온도와 도시환경의 관계. *한국산학기술학회 논문지*. 18(10): 806-816.
- 이나영, 조용성, 임재영. 2014. 폭염으로 인한 기후변화 취약계층의 사망률 변화 분석. *보건사회연구*. 34(1): 456-484.
- 이대근, 최영진, 김규량, 변재영. 2010. 대도시 폭염의 기후보건학적 특성에 기반한 고온건강경보시스템 개발. *한국기후변화학회지*. 1(2): 109-120.
- 임연희. 2019. 폭염이 건강에 미치는 영향. *보건복지포럼*. 269: 7-19.
- 정은주, 윤희철. 2017. 도시열섬현상에 대한 시민의식과 정책적 방안에 관한 연구-광주광역시 사례로. *지역개발연구*. 49(1): 87-110.
- 채여라, 이주형, Chris Hope. 2017. IPCC 신시나리오 체계를 적용한 우리나라 기후변화의 피해비용 분석. *기본연구보고서*. 2017: 1-170.
- 최현정, 이화운, 김민정. 2010. 도심 실제 거칠기 적용과 장래 도심 개발계획에 따른 국지 기상장 변화 수치 모의. *한국환경과학회지*. 19(6): 703-714.
- 행정안전부. 2017. 2016 재해연보.
- 홍남희, 이명훈. 2011. 지속가능한 개발 관점에서의 서울시 도시공간구조 변화특성에 관한 연구. *국토계획*. 46(1): 39-50.

Received: Jun. 21, 2019 / Revised: Jul. 15, 2019 / Accepted: Sep. 27, 2019

도시폭염 동태성 분석

국문초록 본 연구에서는 도시 폭염의 현황과 정책적 요인을 분석하고, 이를 통한 동태적 관계를 분석하고자 한다. 즉 폭염에 영향을 미치는 직·간접적 요인들을 파악하여 통합적인 인과관계를 구축하고자 한다. 연구의 목적 달성을 위하여 도시 폭염의 추세와 경제·사회·환경에 미치는 피해를 분석하였으며 선행연구를 통해 각 요인간의 관계를 고찰하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과가 도출되었다. 첫째, 우리나라의 도시의 온도 증가는 불투수면적 증가에 의해 진행되는 단순한 의미의 도시화가 아니라 지역의 경제·사회·환경 역량 차원에서 빠른 대응이 필요하다는 점이다. 우리나라 도시의 온도 증가를 보다 정확하게 예측하고 설득력 있는 정책방안을 제안하기 위해서는 도시 폭염 과정과 도시 안전성이 매우 비선형적·동태적으로 초래된다는 새로운 접근시각이 필요하다. 셋째, 도시라는 한정된 공간에서 폭염을 유발하는 다양한 요인들 간의 인과관계를 검토하고 도시의 사회경제적 여건을 안전하게 유지할지에 대한 도시 안전 서비스 수준개선 방안을 모색해 보아야만 한다는 것이다.

주제어 : 도시폭염, 도시화, 시스템 사고, 인과지도

Profiles **Yu Mi Kim** : Yu Mi Kim: She is a Ph.D. candidate in the Dept. of Urban Engineering, Chungbuk National University. Her research interests are urban safety, sustainable development, climate change policy, effect of greenery, governance(printand@nate.com).

Yong Un Ban : He received his M.S. from Yonsei University and Ph.D. from University of Pennsylvania. He is a professor of the Department of Urban Engineering at Chungbuk National University(byubyu@chungbuk.ac.kr).

Hye Rim Choi : She received her B.S., from Chungbuk National University, Korea in 2019. She is a candidate for a Master's degree in the Department of Urban Engineering at Chungbuk National University. Her research interests included urban regeneration, urban safety, urban governance(hearim1142@naver.com).

Nam Hee Choi : He received his M.A. from Sungkyunkwan University and Ph.D. from Sungkyunkwan University. He is a professor of the Public Management Information System at Korea National University of Transportation(drnhchoi@ut.ac.kr).