

시스템 다이내믹스를 활용한 폭염대응 정책효과 분석: 대구시 사례연구*

Political Effects of Countermeasures Against Heat Wave Using System Dynamics Method: Case Study in Daegu Metropolitan City

권용석 Kwon Yongseok**, 안유정 Ahn Yoojeong***

Abstract

The heat wave is already a serious natural disaster that has been selected as a major threat to the world by 2020 at the World Economic Forum. As a result, a amount of public funds have been invested for the purpose of countering the heat wave, but it is not reasonable since it has not been closely reviewed for its effectiveness. In this study, Daegu Metropolitan City was set as a pilot system, and among the various heat wave measures, especially focused on the heat wave vulnerable class support project, we analysed using System Dynamic method how the pattern of occurrence of heat sickness, which can be seen as the effect of the policy, changes as the rate of support for the vulnerable class fluctuates. In addition, in terms of the complex prescription of the policy, we also examined the effect of the mixed prescription for the support policies for the vulnerable groups and eco-friendly policies. As a result of the analysis, strengthening the support for the vulnerable groups was confirmed to reduce the number of patients with thermal diseases, and to increase the GRDP and revitalize the local economy. High synergies are expected when supporting eco-friendly policies such as fossil energy reduction along with supporting the vulnerable groups in the heat wave. It is expected that the results of this study will be utilized as a basis for determining the priority of the heat wave countermeasures, thereby contributing to improving the efficiency of the heat wave countermeasures.

Keywords: Heat Wave, Policy Evaluation, System Dynamics(SD), Daegu, System Thinking

I. 서론

1. 연구 배경

세계경제포럼 ‘2020 세계 위험 보고서’에 따르면 2020년을 가장 위협하는 요인은 폭염이다. 이처럼 폭염 리

스크는 기후변화와 인구 고령화라는 환경적, 사회적 변화 속에서 우리 사회의 지속가능성을 위협하는 새로운 변수로 자리매김하고 있다. 2015년 7월 30일 국립기상과학원 보도자료에 따르면 1994년 여름 온열 질환 사망자는 92명, 폭염에 간접적 영향을 받은 초과 사망자가 3,384명에 이르렀다. 이 기록적인 더운 여름

* 본 논문은 대구광역시에서 발주한 ‘대구광역시 폭염 및 도시열섬현상 대응 기본계획’ 과제의 일환으로 진행됨.

** 대구경북연구원 부연구위원(제1저자) | Associated Research Fellow, Daegu Gyeongbuk Institute | Primary Author | kwony@dgi.re.kr

*** 대구경북연구원 객원연구위원, 도시계획 및 설계학 박사(교신저자) | Research Fellow, Daegu Gyeongbuk Institute, Ph.D. in Urban Planning and Design | Corresponding Author | yoojeong.ahn@gmail.com

이후 우리 사회는 폭염이 얼마나 위험한 재해인지를 실감하였다. 그리고 2018년 여름 서울 39.6°C, 강원 홍천 41.0°C라는 기상 관측 이래 역대 최고기온을 기록하면서 폭염 리스크의 체계적 관리의 필요성을 인식하였다. 그 결과 2018년 9월 「재난 및 안전관리 기본법」 개정을 통해 폭염이 신종 법정 자연재난으로 포함되면서 폭염 리스크 관리를 위한 제도적 기반을 마련하였다. 그리고 이에 따라 각 지자체별로 폭염 저감시설 확충사업, 폭염취약계층 돌봄사업, 농축산물 피해보상 등 다양한 정책들을 실제 운영 중이다. 대구시의 경우 자체 조례에 따라 올해 ‘폭염 및 도시열섬 현상 대응 기본계획’을 수립하면서, 향후 5년간 1,156억 원 예산을 폭염 및 도시열섬현상 저감을 위한 사업에 투입하기로 하였다.

이처럼 새로운 정책은 결국 비용을 수반하는 만큼, 그 정책이 기대한 정책효과를 충분히 발휘할 것인지에 대한 면밀한 사전검증이 필요하다. 다만, 폭염에 대한 대처는 넓은 범위로는 도시구조의 개선에서부터 좁은 범위로는 취약계층 돌봄서비스까지 다층적이고, 또한 보건, 환경, 교통, 도시 등 다양한 분야가 교접하는 다학제적인 영역이기도 하다. 따라서 폭염 정책에 대한 면밀한 효과 검증은 특정 부문에 국한하거나 또는 단순한 선형적 관계 속에서가 아닌 환류과정이 포함된 복잡한 인과관계 속에서 검증되는 것이 합당하다.

본 논문은 폭염이라는 리스크 관리를 위한 정책수단들이 최근 다수 도입되었고 그에 따라 많은 비용이 투입되었음에도 불구하고, 그 효과에 대한 사전 검증이 충분히 되지 않고 있는 현실적인 문제에서 출발한다. 매년 위험도가 높아지는 폭염 자연재난에 대해 대규모의 예산을 투입하는 정부 또는 지자체 입장에서 현재 추진 중인 정책의 효과를 종합적으로 판단하여 미래 의사결정을 최대한 합리적으로 이끌어내어야 한다. 하지만 이미 폭염저감 목적으로 다양한 사업들이

활발히 개발, 보급되고 현실에 비해 이것이 실제 어떠한 효과를, 그리고 타 사업과의 관계는 어떠한가에 대한 효과를 면밀히 검토해보는 노력은 상대적으로 빈약한 상태이다.

2. 연구 목적

전술한 현실적 문제로 인해 폭염 관련 다양한 요소들의 인과관계 속에서 각종 폭염 대책의 효과를 최대한 종합적인 시각에서 합리적으로 평가할 수 있는 방안이 모색될 필요가 있다. 본 논문에서는 대구광역시를 하나의 시범적 시스템으로 설정하고 폭염현상 및 조치 사항 간의 인과관계를 규명하고자 하며, 이를 토대로 시스템 다이내믹스 모델링을 적용하여 장기적인 폭염 정책 효과를 분석하고자 한다. 특히 7월에 공식 발표된 정부의 그린뉴딜 관련 정책적 시사점을 얻기 위해 폭염정책 중 취약계층 지원정책과 친환경정책을 모의 실험하여 환경은 물론 사회경제에 미치는 폭염 정책의 파급효과에 대해서 짚어보고자 한다.

3. 연구 방법

본 논문에서는 폭염 정책의 효과를 폭염과 연관성이 있는 농림업, 건강, 산업/에너지, 재난안전 부문별 각 변수들 간의 인과순환적 관계에서 평가하기 위해 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 방법론을 적용하였다. 1950년대 MIT 교수인 제이 포레스터(Jay Wright Forrester)에 의해 개발된 시스템 다이내믹스 방법론은 일반적으로 정책 효과분석을 위한 분석도구로서 장기적인 전략적 모델을 제시한다. 시스템 다이내믹스는 시스템의 구조를 모델화하여 이를 컴퓨터에서 시뮬레이션함으로써 정책효과를 분석하는 방법론이다(김동환 2004, 12) 시스템 다이내믹스는 순환적인 인과관계

의 관점으로 현상을 이해하고 설명하는 시각으로 준거들을 마련하고 이를 바탕으로 현상을 모델링하고 분석하는 방법론이다(문태훈, 고재경 2020, 9). 시스템 다이내믹스 방법론은 일차적으로 사회 문제와 연관된 메커니즘을 기반으로 인과지도를 작성함으로써 정책 수단 변수들을 어떻게 변화시킬 수 있는지를 판단할 수 있으며, 각 요소들의 인과관계 설정을 바탕으로 저장·유량(Stock and Flow)을 분석하고 정책실험 과정을 통해 장기적 정책 효과까지 파악할 수 있는 장점이 있다(윤민호 2016, 37). 시스템 다이내믹스 방법론을 적용하여 정책실험의 실증분석을 연구한 대표적인 사례로는 공공기관이전 정책효과 연구(손동글, 김병석, 허재완 2018), 신재생에너지 정책변화를 고려한 인과지도 분석 연구(권승문, 전의찬 2017)가 있다.

한편, 시스템 다이내믹스를 사회에 전반적으로 확산시키기에는 어려움이 있어 1980년대 이후부터 여러 학자들이 일반인들이 어려워하는 컴퓨터 시뮬레이션 부분을 제외하고 전달하기 용이한 부분만을 간추려서 ‘시스템 사고’라고 명명하기 시작하였다(김동환 2004, 12-13). 여기서 시스템 사고(System thinking)가 시스템 다이내믹스에 그 뿌리를 두고 있다고 본다.

시스템 다이내믹스에서 인과지도의 개념적인 수준을 정량적인 모델의 수준으로 전환하기 위해서는 경성 변수(Hard variables)와 통계자료 등 문헌으로 구하기 어려운 연성 변수(Soft variables)를 포함한다. 연성 변수의 경우, 이에 대한 변수의 검증 문제로 인한 논쟁이 발생할 수 있다. 다만 시스템 다이내믹스 모델에서는 정확하지는 않지만, 경험 및 감정 등 가지고 있는 지식을 동원하여 이에 대한 모델링을 실시하기도 한다. 이는 인간의 멘탈 모델(Mental model)에 바탕을 둔 모델링 구조와 변수가 많았기에 시스템의 행태를 강조하는 시스템 다이내믹스 학문의 특성이다(Sterman 2000; 김도훈, 문태훈, 김동환 1999; 유재국,

곽상만 2006, 101).

시스템 다이내믹스를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 하기 위해서는 다음의 네 단계를 거친다. 첫 번째, 목적에 맞게 문제를 인식 정의하고 모델 경계를 설정한다. 두 번째, 특정 문제를 유발하는 여러 원인들이 어떻게 상호 연결되어 있는가를 인과지도(Causal Loop Diagram)로 작성한다.

인과지도는 해결하고자 하는 문제나 현상과 관련된 여러 변수들 간의 관계를 일련의 순환적인 인과관계의 구조로 표현한다. 독립변수와 종속변수 간의 관계를 일방향의 원인과 결과로 보는 것이 아니라 변수 X가 변수 Y에 영향을 미치고, 영향받은 Y가 다시 X에 영향을 미치는 원형의 순환적 인과관계로 이해한다. 따라서 독립변수와 종속변수의 구분은 의미가 없다(문태훈, 고재경 2020, 8-9). 인과지도에서 피드백 루프의 특성을 살펴보면, 피드백의 유형은 양(+)의 피드백 루프와 음(-)의 피드백 루프가 있다. 양의 피드백 루프는 ‘자기강화(self-reinforcing)’ 루프 또는 ‘일탈강화(deviation amplifying)’ 루프라고도 한다. 용어에서 암시하는 바와 같이 한 변수가 변화되면 그 변화하는 방향으로 영향이 되돌아오기 때문에 변화가 더욱 더 강화되며, 균형점으로부터 벗어나는 변화가 발생하면 그 변화를 더욱더 강화시키는 성질이 있다. 이러한 성질로 양의 루프를 갖고 있는 시스템은 지속적으로 증가하거나 지속적으로 감소한다. 반면, 음의 피드백 루프는 ‘자기균형(self-balancing)’ 루프 또는 ‘일탈억제(deviation counteracting)’ 루프라고 한다. 이 시스템은 성장이나 쇠퇴를 거부하고 안정적인 상태를 유지하려고 하는 균형 루프이다. 한편, 피드백 루프의 극성은 특정 변수의 변화가 피드백 루프를 따라 자기 자신에게 양의 영향으로 되돌아오는가, 음의 영향으로 되돌아오는가를 의미한다(김동환 2004, 146-151).

세 번째, 인과지도 작성을 바탕으로 실제로 정책분

석에 이용될 모델(Stock and Flow Diagram: SFD)을 구축한다. 모델을 구축하기 위해서는 변수들을 구분한다. 모델에 포함되는 변수들은 저장변수(stock variable)와 유량변수(flow variable), 보조변수가 있다. 저장변수는 축적되는 변수이며 유량변수는 저장의 직접적인 변화로 증가와 감소를 의미한다. 또한 보조변수는 유량변수에 영향을 미치는 변수(이관우, 문태훈 2019, 12)이며, 증감변수에 직접 또는 간접적으로 영향을 미치는 모든 변수(김영표 2007, 119)를 의미한다. 즉, 보조변수는 일반적인 형태로 다른 변수의 변화에 원인을 제공하는 기능이 있으며, 수식으로 변수의 기능을 표현하고 값을 변경하는 변수이다. 유량변수는 저장변수의 변화를 일으키는 수식을 갖는 변수이며, 저장변수는 보조변수의 변화 또는 유량변수의 영향을 받아 생성되는 값이 누적되는 변수로 초기값을 가진다(김익현 2015, 28).

시스템 다이내믹스에서의 정량적인 모델은 변수를 수량화한다. 즉, 실제값을 입력하여 시뮬레이션을 수행한다. 이 단계에서는 각 변수 간 피드백을 통해 요인들 간의 동태적 변화를 확인할 수 있다. 네 번째, 작성된 모델에서 작용하는 주요 변수들의 행태를 중심으로 모델의 타당성을 평가한다. 이 단계에서는 구축된 모델을 바탕으로 각종 정책대안을 모의실험하면서 최적의 대안을 찾아낸다(문태훈 2007, 69-70).

본 논문에서는 ‘폭염대응 정책 구성 요소 추출 → 인과지도 작성 → 정책효과 실험’순으로 진행하였다. 첫 번째 ‘폭염대응 정책 구성 요소 추출’ 단계에서는 선행연구에서 폭염과 밀접한 원인으로 지목된 요인들을 일차적으로 가급적 최대한 수집하여 이를 연구자의 분석의 틀에 따라 새로이 갈무리하였다. 두 번째 인과지도 작성 단계에서는 시스템적 사고과정을 토대로 첫 번째 단계에서 갈무리한 요인들 간의 인과순환적 관계도를 작성하였다. 이 과정에서 시스템 사고로

발견된 피드백 관계로부터 단순히 하나로 연결된 폭염 요인들이 총체적인 순환구조 속에서 이들의 관계가 어떻게 연결되어 있는지가 드러난다. 마지막으로 작성된 인과지도를 바탕으로 정량적 시뮬레이션에 필요한 저장-유량 다이어그램(stock-flow diagram)을 구성한다. 여기서는 실제 데이터 값의 입력 값으로 모델을 구성하였고, 통계자료, 보고서 등의 문헌을 통한 가정값을 입력하였다. 작성된 시뮬레이션 모델은 내부 검토와 자문을 통하여 검증을 거쳤다. 본 논문에서는 폭염정책과 관련한 요인들의 장기적 시뮬레이션을 수행한 후, 폭염대응 취약계층 지원율의 증감 변화와 취약계층 지원과 친환경정책 지원 간의 상대적 비율 조정에 따른 변화를 살펴보는 정책 실험을 수행하였다.

4. 선행연구와의 차별성

폭염 정책 효과를 검증한 선행연구로는 양희진, 윤희연(2019), 이수미, 권일, 김용진(2019), 김태호, 백종인, 반영운(2016), 이나영, 조용성(2015), 박재은, 허보영, 선우영(2016), 장용권, 이시경(2019), 박경훈, 송봉근, 박재은(2016), 김유미, 반영운, 최혜림, 최남희(2019) 등이 있다.

양희진, 윤희연(2019)은 2017년 서울시 자치구별 폭염 대응정책 투입현황을 조사하여 지역 자치단체 단위의 폭염 대응정책의 성과 효율성 향상에 관한 시사점을 얻었다. 이수미, 권일, 김용진(2019)은 푸아송 회귀분석과 음이항 회귀분석을 비교하는 방법론은 통해 온열질환자로 대표되는 폭염의 피해가 도시지역별 물리적·사회적 특성과 어떤 관계를 가지는지를 분석하였다. 이와 유사하지만 다중회귀분석을 이용하여 폭염에 관한 사회·경제적 요인을 분석한 김태호, 백종인, 반영운(2016)은 전국의 164개 지자체를 83개의 시와 81개의 군으로 분류하여 폭염으로 인한 건강피

해(호흡기 결핵, 심장 질환, 심혈관 질환)를 중심으로 지역의 사회·경제적 요인이 폭염 발생으로부터 건강에 어떤 영향을 미치는지를 분석하였다. 이나영, 조용성(2015)은 건강보험심사평가원의 표본자료(HIRA-NPS)를 이용하여 65세 이상 호흡기계 및 심혈관계질환자를 대상으로 16개 시·도의 사회·경제적 요인을 고려한 패널 데이터를 구축하여 의료비용에 영향을 미치는 요인을 분석하였으며, 기후변화로 인한 폭염의 영향을 파악하였다. 이외에 지역별 폭염발생 빈도가 온열질환 사망자에 미치는 영향을 분석한 박재은, 히보영, 선우영(2016)은 빈도분석과 상관관계 분석을 활용하여 폭염 발생기간과 지역별 인명피해 자료는 대부분 상관관계가 있음을 밝혔다.

한 지자체를 대상으로 한 연구로는 장용권, 이시경(2019), 박경훈, 송봉근, 박재은(2016)이 있다. 장용권, 이시경(2019)은 대구시 65세 이상 노인을 대상으로 폭염 취약계층 지원 정책의 실질적인 문제점을 파악하고 개선방안을 제시했다. 박경훈, 송봉근, 박재은(2016)은 밀양시를 대상으로 토지피복과 지형과 같은 공간특성이 폭염일수에 미치는 영향을 분석하였다.

한편, 김유미, 반영운, 최혜립, 최남희(2019)는 도시 폭염 현상의 위험성을 파악하고 이와 관련된 구성요소들 간의 상호관계를 파악하는 시스템 사고(system thinking)를 적용하여 도시폭염 현상을 초래하는 요인들의 관계를 살펴보고 이들의 관계로부터 도시폭염이 증폭되지 않도록 폭염에 대응하는 구조를 검토하였다. 이 연구에서는 도시 폭염이나 온도 증가를 예측하는데 있어 전통적인 접근 시각들의 회귀분석 등을 주로 고려하거나 선형적인 요소별 추이를 가정하는 방법은 도시 폭염의 명확한 인과관계를 설명하기 어렵다고 보았으며 이 한계를 넘기 위해 정책 지표의 효과를 검증하는 시뮬레이션 모형 개발의 필요성을 언급하였다. 이 연구 외에도 Zaidi(2018)는 일본 센다이

(Sendai) 관광도시를 대상으로 정부, 건강, 주거, 교육, 에너지, 교통, 산업, 환경, 농업 부문으로 요인을 분류하여 폭염의 위험을 시스템사고로 접근하였다.

이상 살펴본 바와 같이 폭염 대책의 효과를 높이기 위한 정책연구들은 현재까지 다양한 관점에서 활발히 진행되어왔다. 다만 종래의 연구들은 특정한 분야를 중심으로 폭염과 주변 여건과의 관계를 선형적으로 전제된 상태에서 효과를 사후적으로 평가하거나 또는 시스템적 사고를 바탕으로 하더라도 그 필요성을 언급하는 수준에 머물고 있다. 그와 달리 본 논문에서는 폭염 정책과 직접적인 관련이 있는 보건, 환경, 농업, 산업 등 다수의 폭염정책 요인들을 도출하기 위한 문헌 분석을 수행하고 폭염 정책 요인들의 인과 순환적 관계 속에서 정책의 효과를 사전에 계량화하였으며, 시스템 다이내믹스 모델링을 통한 의사결정의 준거를 제공한다는 점에서 선행연구와의 차별성을 지닌다.

II. 분석

1. (1단계) 폭염대응 정책 구성 요소 추출

본 논문에서는 구성변수를 2단계에 걸쳐 추출하였다. 1단계에서는 2018년, 2019년 이상기후보고서(관계부처합동 2018-2019), 2019년 폭염종합대책 추진계획(서울특별시 2019), 2019년 폭염대응 종합대책(대구광역시 2019) 보고서 등과 같은 정책보고서와 선행연구 자료를 종합적으로 고려하여 <Table 1>에서 보듯이 농업, 산림, 환경, 건강, 산업/에너지, 재난안전 6가지 유형으로 변수 후보군을 정리하였다.

이렇게 정리된 변수 후보군은 폭염 정책 시뮬레이션을 위한 경계 설정을 명확히 하고자 <Table 2>와 같이 농림업, 산업/에너지, 건강, 재난안전 4가지 유형에 따라 분류하여 인과지도를 정립하였다. 농림업 부

Table 1_ 1st Review of Heat Wave Constituent Variables

Sector	Heat Wave Policy Variable
Agriculture	Livestock disaster (livestock death, livestock death) Crop test Agricultural facilities collapse Agricultural damage (fruit tree quality) Support for restoration of victims of damage (recovery costs) Public facility damage recovery cost support
Forest	Increased forest damage area Forestry damage recovery support
Environment	Increased urban infrastructure heat stress index Increased probability of ozone warning Increased green algae (blue-green algae) in some water sources Vibrio bacteria separation rate increased Increasing regional conditions and capabilities Disclosure of analysis results of vulnerability to thermal diseases caused by heat waves Promote mid-sized satellite projects for water resources/water disasters Monitoring and prevention of pathogenic vibrio bacteria in marine environment
Health	Reported increase in the number of patients with thermal illness Operation of emergency room monitoring system for warm/cold disease Lecture on prevention and management of food poisoning related to heat wave
Industry/ Energy	Increased power consumption due to heat waves Increased power outage in apartments due to increased power consumption Securing power reserves and securing additional resources for emergency situations
Disaster Safety	Increased risk due to heat wave Personal damage (increased number of people with thermal disease) Property damage (increased livestock and farm fish damage, increased crop damage) Establishing and supporting infrastructure to deal with heat wave On-site inspection of vulnerable areas and vulnerable groups Expansion of hot shelter Promote public awareness, such as heat wave national action tips and parents' hello phone campaign Revitalize the operation of hot shelter Strengthen countermeasures against heat waves for the general public Strengthen site safety management at construction sites Promote heat-related research/development against climate change

Table 2_ 2nd Review of Heat Wave Constituent Variables

Sector	Heat Wave Policy Variable
Agriculture/ Forest	Livestock, livestock mortality, crop damage, agricultural land area reduction, natural disasters, agriculture and forestry damage (crop damage, forest damage), forest fire damage livestock, livestock mortality, crop damage, agricultural land area reduction, natural disasters, agricultural and forestry damage (crop damage, forest damage), Wildfire
Health	Nr. of people with thermal illness, the mortality rate of persons with thermal illness, the amount of human damage, the medical cost per person
Industry/ Energy	Energy consumption (fossil fuel energy, renewable energy), fossil fuel energy, vehicle registration number (fossil fuel vehicle, electric vehicle), automobile exhaust gas emission, power consumption per person, average annual temperature
Disaster Safety	Vulnerable class, vulnerable class heat response, GRDP, budget for heat wave, eco-friendly policy

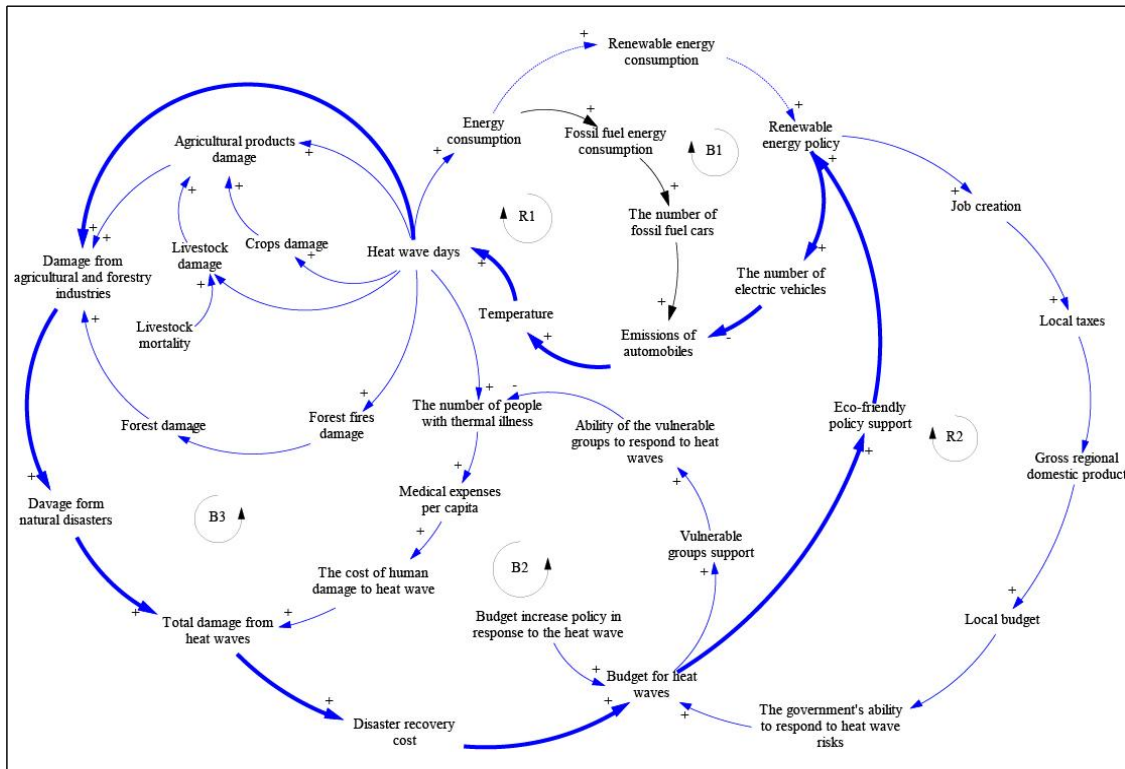
문에서는 기축, 농작물과 산림피해를 중심으로 변수를 선정하였으며, 건강부문은 온열질환자수로 인한 인적피해 발생현황을, 산업/에너지 부문에서는 화석연료에너지와 신재생에너지의 소비에 따라 자동차 배기가스 방출로 폭염일수가 발생할 가능성이 있음을 고려하였다. 또한 이들과 관련된 정부정책으로 취약계층 지원, 친환경정책 지원을 포함한 변수들을 고려하였다.

참고로, 본 논문에서의 취약계층은 독거노인, 야외 근로자, 쪽방생활인, 노숙인을 포함하였다. 온열질환자는 열탈진, 열사병, 열경련, 열실신을 포함하며, 온열질환자는 ‘온열질환 추정 사망자’를 포함하는 수치다.

2. (2단계) 인과지도 작성

이 단계에서는 <Figure 1>과 같이 1단계에서 갈무리한 변수들을 가지고 시스템적 사고에 기초하여 변수 간의 인과 순환적 관계를 인과지도(causal map)라는 하나의 도식으로 정리하였다.

Figure 1_Heat Wave Causal Map



인과지도에 표현된 순환적 인과관계에 대한 설명은 그 복잡성을 감안하여, 여기서는 대표되는 5가지 연결고리를 중심으로 한 설명으로 갈음코자 한다. <Table 3>에 인과지도 중 대표되는 5가지 연결고리의 특성을 정리하였다.

첫 번째, (양의 피드백 R1) 폭염일수와 화석연료에너지 소비 강화루프 1이다. 이 강화루프 1은 폭염 요인들이 기하급수적으로 증가하거나 감소하는 경향을 보이는 양의 피드백관계를 갖고 있다. 이는 폭염일수가 증가함에 따라 냉방 등을 위한 에너지 사용량이 증가하면서 대표 에너지원인 화석연료 소비 또한 늘어남을 가정한 것이다. 홍석환(2013, 758)의 연구에 따르면 화석에너지 이용량 증가는 시가화지역의 온도를 높이는 작용을 한다. 이는 화석에너지를 사용하는

과정에서 인공열이 방출되기 때문이다. 본 논문에서는 대구시 내 전 분야의 화석에너지 총량 자료를 사실상 구득하기 어렵기 때문에 화력에너지를 대표적인 소비원이면서, 동시에 인공열을 방출하는 내연기관인 자동차의 가스배출량 변화가 전체 화석연료 이용량 변화를 충분히 반영할 수 있다고 보았다.

둘째, (양의 피드백 R2) 폭염예산과 친환경정책 지원 강화와 관련된 폭염요인들의 상호관계를 나타낸다. 폭염예산과 친환경정책 지원 강화루프는 폭염예산이 증가함에 따라 정부나 지자체의 친환경정책 지원이 강화될 수 있으며, 이에 신재생에너지 정책이 활성화되고 일자리 창출이 증대되는 관계이다. 일자리 창출에 따른 지역세수 증가로 지역내총생산이 증가함을 보고 다시 지역예산이 늘어남에 따라 폭염 위협에

Table 3 _ Five Main Links in a Causal Map

Links	Object	Dynamic Mechanism	Feedback Loop Type and Polarity*
R1	HW days and fossil fuel energy consumption	Increased heat wave days → Increased energy consumption → Increased fossil fuel energy consumption → Increased use of fossil fuel cars → Increased emissions of automobiles → Increased temperature → Increased heat wave days	Reinforcing loop(+)
R2	HW budget and eco-friendly policy support	Increased budget for heat waves → Reinforcement of eco-friendly policy support → Revitalization of new and renewable energy policies → Increase in job creation → Increase in local taxes → Increase in gross regional domestic product → Increase in local budget → Increasing the government's ability to respond to heat wave risks → Increase in heat wave budget	Reinforcing loop(+)
B1	HW days and renewable energy policy	Increased heat wave days → Increased energy consumption → Increased renewable energy consumption → Increased renewable energy policy → Increased use of electric vehicles → Reduced emissions of automobiles → Lower temperature → Reduced heat wave days	Balancing loop(-)
B2	Support for the number of people with thermal diseases and vulnerable groups according to HW	Increasing the number of people with thermal illness → Increasing medical expenses per capita → Increasing the cost of human damage to heat wave → Increasing total heat wave damage → Increasing disaster recovery cost → Increasing the heat wave budget → Reinforcing support for the vulnerable class → Increasing the ability of the vulnerable groups to respond to heat waves → Decreasing the number of heat disease patients	Balancing loop(-)
B3	HW days and natural disasters	Increased number of heat wave days → Increased damage from agricultural and forestry industries → Increased damage from natural disasters → Increased total damage from heat waves → Increased disaster recovery costs → Increased heat wave budget → Enhanced support for eco-friendly policies → Reinforced renewable energy policy → Increased number of electric vehicles → Reduced emissions of automobiles → Temperature decrease → Heat wave days decrease	Balancing loop(-)

대한 정부의 대응력이 강화되고 다시 폭염 예상이 증가함으로써 기후변화 대비 방안의 일부로 폭염대응 정책이 강화되는 피드백 구조이다.

셋째, (음의 피드백 B1) 폭염일수와 신재생에너지 정책간의 균형을 살펴보는 구조이다. 이 인과구조는 음의 피드백 관계이다. 폭염 요인들의 음의 피드백 관계는 균형루프를 보였다. 여기서 균형루프란 폭염요인들이 상호작용하는 과정에서 각 요인들을 균형 상태로 유지하여 변화를 억제하는 것을 의미한다. 즉, 폭염일수가 증가함에 따라 에너지 소비량이 많아지면서 신재생에너지 소비 또한 증가하게 된다. 이 과정에서 신재생에너지에 대한 지원정책이 강화되면 전기차 동차 소비 및 사용이 증가하여 자동차 배기가스 방출을 감소시켜 결국 폭염일수가 감소하는 관계이다.

넷째, (음의 피드백 B2) 폭염일수에 따른 온열질환자수와 취약계층 지원 간의 균형루프이다. 이 인과순환관계는 온열질환자수가 점점 증가함에 따라 1인당 의료비용 지출이 증가하고 전반적으로 폭염 인적피해액이 증가한다고 본다. 이에 따라 폭염으로부터 발생하는 폭염 총 피해액이 증가함에 따라 정부나 지자체의 재난복구비용이 증가할 수 있으며 재난복구를 위한 폭염예상이 증가함으로 인적피해액을 줄이기 위한 정책수단의 일환으로 취약계층 지원을 강화할 수 있다. 이에 따라 취약계층 폭염 대응력이 증대됨으로써 온열질환자수는 감소한다고 보는 것이다.

다섯째, (음의 피드백 B3) 폭염일수와 폭염 자연재해 피해 간의 균형루프이다. 폭염일수가 증가하면서 농림업 피해는 물론 도로 파열, 철로 탈선, 생산중단

등 폭염피해가 우리나라 전반으로 확산된다. 이처럼 자연재난급 폭염에 대한 재난복구비용 증가는 폭염예산을 증액시키는 증폭 요인이 될 수 있다. 폭염예산 증대는 다시 자연재해 피해를 줄이기 위한 정책으로 친환경정책 지원을 강화하여 신재생에너지 정책을 증대시키는 구조를 일으킨다. 이에 신재생에너지 정책의 일환으로 전기자동차수를 늘리고 전기자동차 이용수가 증가함에 따라 자동차 배기가스 방출이 감소함으로써 결국은 기온과 폭염일수를 줄이는 인과순환구조를 갖고 있음을 알 수 있다.

3. 정책효과 실험

다음으로 본 논문에서는 폭염정책의 장기적인 대책방

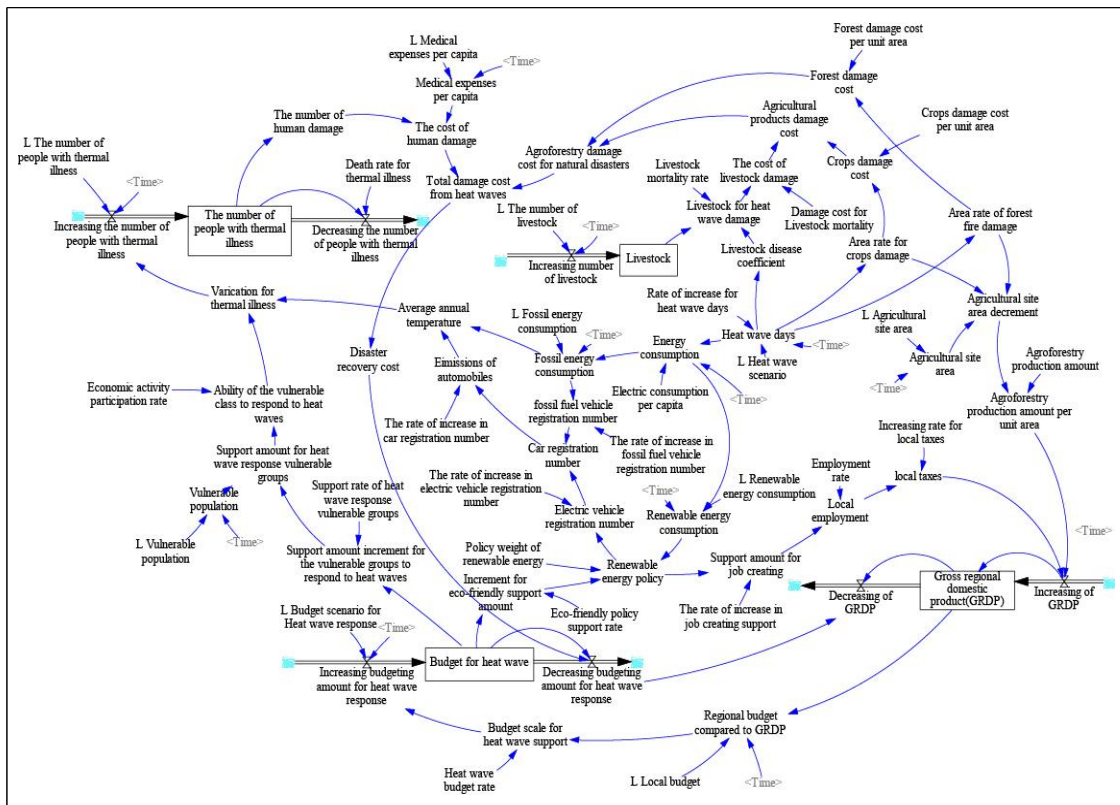
안 마련을 위해 폭염과 얽혀져 있는 요인들이 장기적으로 폭염 정책 효과에 어떠한 영향을 미칠지를 실험해보고자 정책실험을 수행하였다.

본 논문에서의 정책 시뮬레이션 과정에서는 취약계층 지원율의 증감에 따른 변화와 친환경정책지원간의 상대적 비율 조정에 따른 변화를 중심으로 연구를 진행하였다.

1) 실험 세팅

본 논문에서는 폭염과 관련된 요인들을 수량화하고 실제값을 적용하기 위해 <Figure 2>와 같이 저장·유량 흐름도를 구성하였다. <Figure 2>의 SFD모형을 전체적으로 살펴보면 온열질환자수, 가축, 폭염대응

Figure 2_Heat wave Stock and Flow Diagram



예산, 지역내총생산(GRDP) 변수는 지량변수이며, 유량변수로는 온열질환자수의 증가 및 감소, 폭염대응 예산의 증가 및 감소, 가축의 증가, 지역내총생산의 증가 및 감소로 구성되었다. 보조변수는 온열질환자 수 증가에 영향을 미치는 변수, 폭염대응예산의 증가에 미치는 영향 등 유량변수에 영향을 미치는 변수로 폭염-건강 변수의 폭염대응 취약계층 지원변수, 폭염-산업에너지 관련 변수의 친환경정책 지원변수, 신재생에너지 정책 변수 등, 폭염-농림업 관련 변수로 폭염피해 기착수, 농산물 피해액, 산불피해액 등이 있다.

본 논문에서의 시물레이션 기간은 2011~2040년이며, 10년 단위로 동태적 변화를 살펴보았다. 본 과업에서 폭염 모델에 사용한 변동률 값은 다음과 같이 가정하였다. 온열질환자의 경우, 질병관리본부의 폭염한파로 인한 급·만성 질병 및 사망률 예측 보고서(홍윤철 외 2019, 87)에 의하면, 2011~2016년 대구광역시 온열응급 비율이 2.07%이다. 이를 고려하여 대구광역시 온열질환자 발생률 2%를 고려하였다. 폭염 시나리오에 적용된 수치값은 2011~2019년의 경우 경험적 자료로 기상자료개방포털 자료를 이용하였다. 그 이후는 ‘한국 기후변화 평가보고서 2020’에 근거하여 폭염일수가 지속적인 증가한다고 가정하였다(Yeh, Won, Hong and Lee et al. 2018, 1464). 기후모델의 RCP 4.5 시나리오 모의결과에 따르면 21세기 후반(2075~2099)에 폭염 발생은 약 52.5일 증가하며, 폭염지속기간은 약 44.55일 증가할 것으로 전망하였다(기상청 2020, 23). 이를 고려하여 본 논문에서는 RCP 4.5 기준 21세기 전반기인 2011~2040년에 해당하는 폭염시나리오의 연간 평균 증가율을 2%라고 가정하였다. 화석연료에너지 소비량의 경우 지역에너지 소비 통계자료의 통일성을 갖기 위해 화석연료는 석유

만을 적용하였으며, 농림업 생산액의 경우, 전국 농경지면적 대비 대구광역시 농경지면적 비율이 0.5%임을 고려하여 전국 농림업생산금액 대비 대구광역시 농림업 생산금액을 추정하였다. 또한 자동차 등록대수 증가는 연간 2~3% 증가(한국전기자동차협회¹⁾)함을 고려하여 이를 분석에 적용하였다.

2) 정책 실험 수행

본 모델은 폭염일수의 증가에 따라 폭염 정책을 이행 시 폭염정책 관련 변수들 간의 동태적인 변화를 수량화한다. 본 모델을 통해 이번 연구에서는 취약계층 지원 부문과 친환경정책부문 지원 강화를 중심으로 하여 온열질환자수가 어떻게 변화하는지를 정량적으로 확인하였다. 본 논문에서의 친환경정책부문은 신재생에너지 정책에 따른 자동차 신재생에너지 증대, 화석에너지 사용 감축에 국한하였다(<Figure 2> 참조). 시물레이션은 아래와 같이 2가지 상황으로 나누어 실시하였다.

■ 정책실험 1 : 폭염대응 취약계층 지원을 증감 (50% → 10%, 50% → 90%)

■ 정책실험 2 : 취약계층 지원과 친환경정책 지원간의 상대적 비율 조정

3) 실험 결과

정책실험 1의 경우 <Figure 3>과 <Table 4>에서 보듯이, 폭염 관련 변수들의 동태적 변화 과정에서 폭염대응 취약계층 지원을 기준 50%(가정)에서 폭염대응 취약계층 지원을 10%로 크게 감소시켰다고 가

1) <http://keva.or.kr> (2020년 6월 8일 검색).

Figure 3 _ Dynamic Change in the Nr. of Patients with Thermal Disease When the Support Rate of Vulnerable Groups Changes

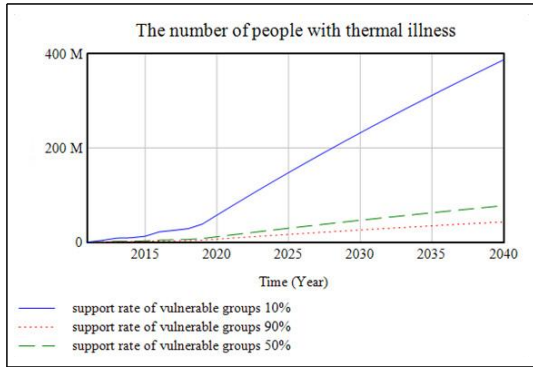


Figure 4 _ Dynamic Change in the Nr. of Patients with Thermal Disease due to Comparative Advantage between Vulnerable Class Support and Eco-friendly Policies

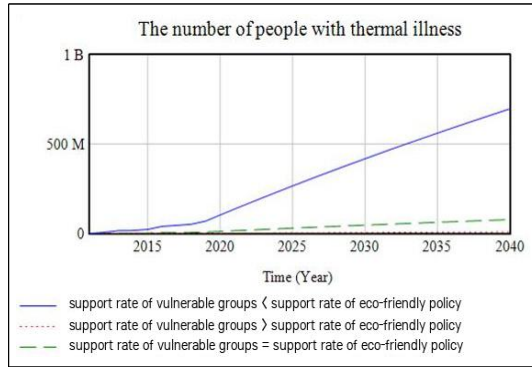


Table 4 _ Changes in the Nr. of Patients with Thermal Disease When the Support Rate of Vulnerable Groups Responds to Heat Waves

(unit: thousand)

Vulnerable Class Support Rate	2011	2020	2030	2040
50% (standard)	0.027	1.14519	4.64723	7.75014
10%(▽)	0.027	5.72593 (△)	23.2361 (△)	38.70507 (△)
90%(△)	0.027	0.636217 (▽)	2.5818 (▽)	4.30564 (▽)

정했을 경우 정책실험을 위한 민감도 분석 시 대구시 전체의 온열질환자수는 2040년에 이르러 3억 8천 명²⁾으로 크게 증가할 것으로 예측되었다. 이와 반대로, 폭염대응 취약계층 지원율을 90%로 가정한 후 정책실험을 했을 경우에 온열질환자수는 2040년이 될 경우 4천 3백 명 정도로 감소하였다.

정책실험 2의 경우 <Figure 4>와 <Table 5>에서 보듯이, 폭염정책 시 취약계층 지원율이 친환경정책 지원율보다 높을 경우 폭염과 관련된 변수들의 동태

Table 5 _ Changes in the Number of Patients with Thermal Disease that Appear in Policy Differences between Support for Vulnerable Groups and Support for Eco-friendly Policies

(unit: thousand)

Comparative advantage	2011	2020	2030	2040
Vulnerable class support rate (A) 50%	A=B	0.027	1.14519	4.64723
Eco-friendly policy support rate (B) 50%				
Vulnerable class support rate (A) 90%	A>B	0.027	0.127251 (▽)	0.516367 (▽)
Eco-friendly policy support rate (B) 10%				
Vulnerable class support rate (A) 10%	A<B	0.027	10.3066 (△)	41.825 (△)
Eco-friendly policy support rate (B) 90%				

적 변화를 살펴보면, 각 폭염지원율이 동일할 때 온열질환자수는 시간이 지남에 따라 전반적으로 수치가 감소하였다. 한편, 취약계층 지원율이 친환경정책 지원율보다 낮을 경우에는 온열질환자수는 7천 7백 명에서 6억 9천 명으로 크게 증가함을 보였다.

2) 이 예측값은 모델 내 인구변수에 대한 한계치를 설정해놓지 않은 상태에서 산출된 순수 이론값임. 이 값은 실제 대구광역시 인구수 (약 2만 5천 명)보다 훨씬 큰 수치로 해석 시 주의가 필요.

III. 결론

1. 논의

본 논문에서는 대구광역시가 겪고 있는 폭염 문제를 다른 시각으로 재해석하기 위하여 시스템 다이내믹스 방법론을 적용하였으며, 폭염 정책효과를 분석하기 위하여 시스템사고(System thinking)에서 시스템 다이내믹스(System dynamics)까지 확장하여 폭염 관련 요인들 간의 관계분석을 통한 장래예측 분석을 시도하였다. 그 결과, 본 논문에서는 다음과 같은 시사점을 확인하였다.

첫째, 인과지도를 통해 폭염 취약계층 지원정책은 새로운 일자리 창출과 지역경제를 살릴 수 있는 피드백 과정이 있음을 파악하였다. 즉, 폭염 취약계층 지원을 강화한다면 인적피해 감소는 물론 취약계층이 보다 현실적으로 경제활동에 참여하면서 새로운 일자리 창출은 물론 GRDP가 전반적으로 증가하게 되는 경기부양 효과도 기대된다. 이점은 현 정부가 추진하는 그린뉴딜 정책취지에 부합한다. 따라서 향후 폭염 정책은 그린뉴딜의 틀 속에서 정부와 지자체의 긴밀한 공조를 통해 추진할 필요가 있다.

둘째, 폭염정책 시 폭염과 관련된 의료보건 외에 농림업, 산업/에너지 등 전반에 대한 정책의 효과를 평가할 필요가 있다. 기온이 증가하면 응급실을 방문하는 온열질환자 수도 함께 증가한다(임연희 2019, 14). 이에 따라 기후변화로 지속적인 기온상승이 예견된 만큼 정부나 각 지자체에서는 폭염 정책 효과를 높이기 위해 무더위 쉼터나 응급조치 시설 확충 등 인적 피해 저감을 위한 조치를 확대할 필요가 있다. 본 연구에서는 인과지도 작성과정을 통해 이러한 인적 피해 외에도 가축폐사나 식물고사 등 농림업 부문에 미치는 폭염피해 또한 상당할 수 있기 때문에 이 부분

또한 간과해서는 안 된다는 사실을 확인하였다. 다만 자연재해 피해는 인명피해에 비해 그 발생 양태가 거시적이고 느리기 때문에 정책효과 측면에서 저평가되는 경향이 있다. 하지만 각종 폭염정책의 효과는 폭염을 둘러싼 다양한 정책들의 인과관계에 따라 다른 결과로 나타난다(양희진, 윤희연 2019, 41). 따라서 비록 기존의 평가방식으로 저평가되는 요소라고 해도 인과관계상에서 정책효과를 종합적으로 평가할 수 있는 평가체계 전환이 필요하다.

셋째, 취약계층 지원율을 높이는 동시에 친환경정책 비중 또한 강화할 필요가 있다. 친환경정책을 활성화하면서 폭염발생 원인을 줄이는 방안이 동시에 고안될 때 폭염정책 효과가 클 것이다. 친환경정책과 폭염이 갖는 피드백 관계를 살펴봄으로써 전반적인 폭염정책 효과를 파악할 수 있다.

지금까지 폭염 정책에 대한 효과평가는 주로 쿨링포그, 그늘막, 쿨루프 등 시설설치 사업을 중심으로 이론적이고 단편적으로 이루어졌다. 여기서 이론적이란 의미는 시설 설치 시 몇 도씨 정도의 온도저감 등과 같이 설치시설의 성능을 기술적으로 평가하는 데 초점이 맞춰져 있다는 뜻이며, 단편적이란 의미는 시설 하나만을 봄으로써 시설을 이용하는 이용자 또는 시설비용을 부담하는 관리자 등 시설과 관련된 다양한 상호관계를 고려하지 못한다는 뜻이다. 이러한 점을 고려해 볼 때, 폭염정책과 연관된 건강, 산업/에너지, 농림업, 자연재난의 인과관계를 개별적이 아닌 서로 연결된 총체적인 관점에서 폭염정책수단을 논함으로써 폭염정책의 효과는 한층 더 깊이 있게 다루어질 것이라고 사료된다. 일례로 폭염정책에서 온열질환자수를 줄이기 위한 정책으로 취약계층 지원을 중심으로 정부예산을 활용함으로써 직접적인 정책 효과를 볼 수 없으며 친환경정책의 강화와 자연재해의 피해를 줄이는 정책 방향 등을 함께 고려함으로써 폭염

정책의 효과는 의미가 있을 것으로 보인다.

2. 연구의 성과와 향후과제

본 논문은 시스템 다이내믹스를 적용하여 폭염 정책을 둘러싼 다양한 요인들 간의 인과관계를 고려하고 폭염 정책의 장기적인 효과분석을 수행하였다. 본 논문을 통해 앞으로 폭염리스크를 줄이기 위한 정책으로 나아가야 할 방향을 재정립하고 폭염 정책의 기초자료가 마련되었다는 점에서 이번 연구의 의의를 찾고자 한다.

본 논문에서는 대구광역시의 폭염대응정책의 효과를 분석하기 위하여 과업 범위를 농림업, 건강, 산업/에너지, 자연재난 부문으로 한정하였다. 분석을 통해 본 논문은 폭염 정책 시 취약계층 지원과 친환경정책 지원의 중요성이 높아지고 폭염 시 취약계층이 가져오는 인적피해와 더불어 자연재해 피해를 함께 고려해야 할 필요성을 확인하였다. 그러나 본 논문은 폭염 정책 선정 시 더 깊이 있는 논의를 위하여 연성변수로 어업이나 수자원 부문을 분석에 적용하면 좀 더 정교한 모델이 될 수 있으리라고 사료되며, 본 논문에서 정책실험 결과분석 해석 시 온열질환자수와 밀접한 관련이 있는 인구와의 관계도 추가적으로 설정하여 연구 영역을 확장한다면 보다 심도 있고 효과적인 폭염정책 시뮬레이션을 수행할 수 있을 것이라 보인다.

참고문헌 ●●●●

1. 관계부처 합동. 2018. 2018년 이상기후 보고서. 서울: 기상청.
Joint Association of Related Ministries. 2018. 2018 Abnormal Weather Report. Seoul: KMA.
2. 권승문, 전의찬. 2017. 신재생에너지 정책변화를 고려한

인과지도 분석. 한국시스템다이내믹스연구 18권, 1호: 161-175. <http://doi.org/10.32588/ksds.18.1.6>

Kwon Seungmoon and Jeon Euichan. 2017. A study on casual loop diagrams considering renewable energy policies change. *Korean System Dynamics Review* 18, no.1: 161-175. <http://doi.org/10.32588/ksds.18.1.6>

3. 기상자료개방포털. <http://data.kma.go.kr> (2020년 6월 8일 검색)
KMA Meteorological Data Open Portal. <http://data.kma.go.kr> (accessed June 8, 2020)
4. 기상청. 2020. 한국 기후변화 평가보고서 2020: 기후변화 과학적 근거. 서울: 기상청.
Korea Meteorological Administration. 2020. *Korean Climate Change Assessment Report 2020*. Seoul: Korea Meteorological Administration.
5. 김도훈, 문태훈, 김동환. 1999. 시스템 다이내믹스. 고양: 대영문화사.
Kim Doohoon, Moon Taehoon and Kim Donghwan. 1999. *System Dynamics*. Goyang: Deayoungmunhwasa.
6. 김동환. 2004. 시스템사고. 서울: 선학사.
Kim Donghwan. 2004. *System Thinking*. Seoul: Sunhaksa.
7. 김영표. 2007. 시스템다이내믹스 기법: 미래예측에서 정책효과 측정까지. 국토 312호, 117-127. 세종: 국토연구원.
Kim Youngpyo. 2007. System dynamics technique: from predicting the future to measuring policy effects. *Planning and Policy* no.312, 117-127. Sejeong: Korea Research Institute for Human Settlements.
8. 김유미, 반영운, 최혜림, 최남희. 2019. 도시폭염 동태성 분석. 한국위기관리논집 15권, 9호: 39-48.
Kim Yumi, Ban Yongun, Choi Hyerim and Choi Namhee. 2019. A system dynamics analysis of urban heat waves. *Crisisonomy* 15, no.9: 39-48.
9. 김익현. 2015. 시스템 다이내믹스를 活用한 在庫管理政策 研究. 박사학위논문, 한남대학교.
Kim Ikhyun. 2015. *A Study on the Inventory Management Policy*. Ph.D. diss., Hannam National University.
10. 김태호, 백종인, 반용운. 2016. 폭염으로 인한 건강 피해와 사회경제적 요인 간 관계분석. 한국위기관리논집 12권, 5호: 67-78.
Kim Taeho, Baek Jongin and Ban Yongun. 2016. Analyzing the relationship between health damage caused by heat wave and socioeconomic factors. *Crisisonomy* 12, no.5: 67-78.

11. 대구광역시. 2019. 2019년 폭염대응 종합대책. 5월 15일. Daegu. 2019. Comprehensive plan for heat wave measures. May 15.
12. 문태훈. 2007. 시스템사고로 본 지속가능한 도시. 서울: 집문당.
Moon Taehoon. 2007. *Sustainable City on System Thinking*. Seoul: Jibmundang.
13. 문태훈, 고재경. 2020. 시스템사고를 이용한 정책과 지속가능발전목표(SDGs)의 인과구조 탐색: 경기도 정책과제와 경기도 지속가능발전 목표(G-SDGs)를 중심으로. 한국시스템다이내믹스연구 21권, 2호: 5-30. <http://doi.org/10.32588/ksds.21.2.1>
Moon Taehoon and Koh Jaekyung. 2020. Analysis on causal structure of policy and SDGs using system thinking: Focusing on Gyeonggi-do's policy tasks and G-SDGs. *Korean System Dynamics Review* 21, no.2: 5-30. <http://doi.org/10.32588/ksds.21.2.1>
14. 박경훈, 송봉근, 박재은. 2016. 토지피복유형과 지형특성이 폭염일수에 미치는 영향 분석. 한국지리정보학회지 19권, 4호: 76-91.
Park Kyunghun, Sonh Bonggeun and Park Jaeeun. 2016. Analysis on the effects of land cover types and topographic features on heat wave days. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 19, no.4: 76-91.
15. 박재은, 허보영, 선우영. 2016. 폭염에 의한 지역별 인명피해 발생에 관한 연구. 한국방재학회논문집 16권, 1호: 103-109.
Park Jaeeun, Heo Boyoung and Young Sunwoo. 2016. A study on human damage due to heat wave by region. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 16, no.1: 103-109.
16. 박현, 김민경, 서한진, 이동기, 김보국. 2005. 통합된 지역 일원화 대응체계구축을 통하여 가축 및 인수수공통전염병에 대한 대응체계 모델제시에 관한 연구. 한국위기관리논집 1권, 2호: 15-24.
Park Hyun, Kim Mingyeoung, Seo Hanjin, Lee Donggi and Kim Boguk. 2005. Construction of local united confrontation system and uses this system for control of zoonosis. *Crisisonomy* 1, no.2: 15-24.
17. 서울특별시. 2019. 2019년 폭염종합대책 추진계획. 5월 27일. Seoul. 2019. 2019 Comprehensive plan for heat wave measures. May 27.
18. 손동글, 김병석, 허재완. 2018. 시스템다이내믹스를 이용한 공공기관이전 정책 효과에 관한 연구: 수도권을 중심으로. 한국시스템다이내믹스연구 19권, 2호: 33-51. <http://dx.doi.org/10.32588/ksds.19.2.2>
Son Donggeul, Kim Byungsuk and Hur Jaewan. 2018. A study on the effectiveness of the relocating public organization policy using system dynamics: Focused on the Seoul Metropolitan Area. *Korean System Dynamics Review* 19, no.2: 33-51. <http://dx.doi.org/10.32588/ksds.19.2.2>
19. 양희진, 윤희연. 2019. 도시 폭염 대응정책의 성과 효율성: 서울시 온열질환 상병자수 및 의료지출을 대상으로. 도시행정학보 32권, 1호: 31-45. <http://doi.org/10.36700/KRUMA.2019.03.32.1.31>
Yang Heejin and Yoon Heeyun. 2019. Measuring the efficiency of heat-wave action programs in urban environments: Using heat-related illness Data in Seoul, South Korea. *Journal of the Korean Urban Management Association* 32, no.1: 31-45. <http://doi.org/10.36700/KRUMA.2019.03.32.1.31>
20. 유재국, 광상만. 2006. 신·재생에너지 시장 확장의 동태적 분석. 한국시스템다이내믹스연구 6권, 2호: 95-116.
Yu Jaekook and Kwak Sangman. 2006. A Dynamic analysis of the deployment of Korean renewable energy market. *Korean System Dynamics Review* 6, no.2: 95-116.
21. 윤민호. 2016. 특허 시스템의 정량 분석을 위한 시스템 다이내믹스 모형. 한국시스템다이내믹스연구 17권, 2호: 33-56.
Yoon Minho. 2016. A system dynamics model for quantitative of patent systems. *Korean System Dynamics Review* 17, no.2: 33-56.
22. 이나영, 조용성. 2015. 여름철 폭염발생에 따른 고령자층의 의료 비용 추정 및 요인 분석. 환경정책 23권, 2호: 153-172.
Lee Nayoung and Cho Yongsung. 2015. Estimation of the medical costs incurred by the elderly in Korea due to heat waves and analysis of the causes for expenditure. *Journal of Environmental Policy and Administration* 23, no.2: 153-172.
23. 이수미, 권일, 김용진. 2019. 도시환경이 온열질환 발생에 미치는 영향에 관한 연구. 한국콘텐츠학회 논문지 19권, 12호: 84-92. <http://doi.org/10.5392/JKCA.2019.19.12.084>
Lee Sumi, Kweon Ihl and Kim Yongjin. 2019. A study on the influence of urban environment on the generation of

- thermal diseases. *International Journal of Contents* 19, no.12: 84-92. <http://doi.org/10.5392/JKCA.2019.19.12.084>
24. 이판무, 문태훈. 2019. 시스템다이나믹스를 이용한 관광 도시의 지속가능한 발전모델에 관한 연구. *한국시스템다이나믹스연구* 20권, 3호: 5-27. <http://doi.org/10.32588/ksds.20.3.1>
Li Panwu and Moon Taehoon. 2019. A study on sustainable development model of tourism city using system dynamics. *Korean System Dynamics Review* 17, no.3: 5-27. <http://doi.org/10.32588/ksds.20.3.1>
25. 임연희. 2019. 폭염이 건강에 미치는 영향. 보건복지포럼 269권, 7-19. 세종: 한국보건사회연구원.
Lim Younhee. 2019. The health effects of heat waves. *Health and Welfare Policy Forum* no.269. Sejong: Korea Institute for Health and Social Affairs.
26. 장용권, 이시경. 2019. 기후변화로 인한 폭염 취약계층 지원 정책에 대한 사례연구: 대구시 노인계층을 중심으로. *한국위기관리논집* 15권, 10호: 43-60.
Jang Younggeun and Lee Sikyung. 2019. A case study on the heatwave policy for vulnerable population due to climate change-focused on the elderly in Daegu city. *Crisisonomy* 15, no.10: 43-60.
27. 채여라, 문태훈, 김동환, 이동성, 정수영, 이경택. 2016. 기후변화 대응역량 강화를 위한 시스템다이나믹스 모델 개발. 세종: 한국환경정책·평가연구원.
Chae Yeora, Mun Taehoon, Kim Donghwan, Lee Dongsung, Jeong Suyoung and Lee Kyungtaek. 2016. *Developing System Dynamics Model for Strengthening Climate Change Responding Capability*. Sejong: Korea Environment Institute.
28. 한국전기자동차협회. <http://keva.or.kr> (2020년 6월 8일 검색).
Korea Electric Vehicle Association. <http://keva.or.kr> (June 8, 2020).
29. 홍윤철 외. 2019. 폭염·한파로 인한 급·만성질환 및 사망률 예측 연구. 청주: 질병관리본부.
Hong Yunchul et al. 2019. *Estimation of Acute·chronic Disease and Mortality in Extreme Weather(heat·cold) in Korea*. Cheongju: Korea Centers for Disease Control and Prevention.
30. 홍석환. 2013. 도농복합도시 온도상승 영향요인 분석: 경남 밀양시를 대상으로. *한국환경생태학회지* 27권, 6호: 757-764.
Hong Sukhwan. 2013. Cause analysis of the rising temperature in mixed city of urban and rural area: Case of Miryang City, Kyongsangnamdo. *Korean Society of Environment and Ecology* 27, no.6: 757-764.
31. Sterman, J. D. 2000. *Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. NY: McGraw-Hill.
32. Yeh Sangwook, Won Youjin, Hong Jinsil, Lee Kangjin, Kwon Minho, Seo Kyonghwan and Ham Yoogeun. 2018. The Record-breaking heat wave in 2016 over South Korea and its physical mechanism. *Monthly Weather Review* 147, no.5: 1463-1474. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0205.1>
33. Zaidi, R. Z. 2018. Beyond the Sendai indicators: Application of a cascading risk lens for the improvement of loss data indicators for slow-onset hazards and small-scale disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 30: 306-314. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.03.022>

- 논문 접수일: 2020. 6. 11.
- 심사 시작일: 2020. 7. 6.
- 심사 완료일: 2020. 9. 14.

요약

주제어: 폭염, 정책효과, SD, 대구, 시스템 사고

폭염의 세계경제포럼에서 2020년 세계를 위협하는 주요 요인으로 뽑힐 만큼 이미 심각한 자연재난이다. 이에 따라 적지 않은 공적 자금이 폭염대응 목적으로 투입되고 있지만, 그 효과가 어느 정도인지에 대한 면밀한 사전검토는 못 하고 있어 합리적이지 못한 부분이 있다. 본 논문에서는 대구광역시를 하나의 시범적 시스템으로 설정하여 여러 폭염 대책 중 특히 폭염 대책 중 대표적인 폭염 취약계층 지원 사업을 중심으로, 폭염 취약계층지원을 변동에 따라 정책의 효과로 볼 수 있는 온열질환자 발생패턴은 어떻게 변화하는지를 동적 분석모델을 통해 살펴보

았다. 아울러 정책의 복합 처방이라는 측면에서 폭염 취약계층 지원 정책과 친환경정책을 복합 처방 시 그 효과는 어떠한 것인지를 살펴보았다. 분석결과 폭염취약계층 지원을 강화하면 온열질환자수 저감은 물론, GRDP 상승과 함께 지역경제를 활성화하는 효과를 확인하였다. 폭염 취약계층 지원과 함께 화석에너지 감축 등 친환경정책 지원을 동일한 수준으로 병행할 경우, 높은 시너지 효과가 기대된다. 본 논문의 연구결과는 폭염 대책의 우선순위를 결정하는 근거로서 활용되어 폭염 대책의 효율 제고에 기여할 것으로 기대된다.

Appendix Table 1 _Formula Definitions and Sources Used in Model Development

Sector	Indicators	Parameter	Unit	Formula	Source
Heatwave	L Heatwave Scenario	-	day	In 2011-2019, the weather data open portal data, after that, a lookup function considering the annual average increase rate of 2% (assuming)	Weather open data portal (http://data.kma.go.kr) Korea Climate Change Assessment Report 2020(Meteorological Agency)
	Increase rate of heatwave days	0.01	-	Rate of increase 1%	Assumption
	Total heatwave damage	-	Bil. won	Human damage + damage in agriculture and forestry sector	
Health	L Number of people with heat disease	-	person	From 2011 to 2018, the Korea Centers for Disease Control and Prevention statistics data, and after that, an annual growth rate of 2% to establish a lookup function.	Korea Centers for Disease Control and Prevention
	Mortality rate of people with heat disease	0.01	-	-	Assumption / Lim (2019, 13)
	+/- rate of Number of people with heat disease	-	-	Annual average temperature/response to heat waves of vulnerable groups	
	Number of human damage	-	person	Number of people with heat disease	
	Human damage	-	Bil. won	Medical expenses per person*Number of human damage	
	L Medical expenses per person	-	Bil. won	From 2011-2018, data from the National Statistical Office, and after that, a lookup function by considering the 2011-2018 average.	Statistical Office
	L Vulnerable population	-	person	Based on the 166,474 people of the vulnerable class in 2015, the proportion of the population of the vulnerable class compared to the resident-registered population was 6%. Considering this, build a Lookup function	Daegu Metropolitan City Statistics
Response to heatwaves for the vulnerable	-	-	Support for vulnerable groups in response to heatwaves + (Support for vulnerable groups in response to heatwaves * participation rate in economic activities)		
	Local budget compared to GRDP	-	ratio	Local Budget/Gross Regional Product (GRDP)	Statistical Office

Sector	Indicators	Parameter	Unit	Formula	Source
Local economy/ Budget	1. Local budget	-	Bil. won	From 2011-2017, data from the National Statistical Office, and after that, a lookup function by applying an annual average growth rate of 1% and 1% (assuming).	Statistical Office
	Gross Regional Product Growth	-	Bil. won	Gross regional product + agricultural and forestry output per unit area + local tax	
	Gross regional product consumption	-	Bil. won	Gross regional product-heat wave response budget consumption	
	Heatwave Response Budget Consumption	-	Bil. won	Heatwave Response Budget-Disaster Recovery Cost	
	Disaster recovery cost	-	Bil. won	Total heatwave damage	
	Heatwave response budget	-	Bil. won	Heatwave Response Budget + Heatwave Support Budget	
	Heatwave Support Budget	-	Bil. won	Regional budget ratio to GRDP* heatwave budget	
	L Heatwave Response Budget Scenario	-	Bil. won	From 2011-2017, data from the National Statistical Office, and after that, a lookup function considering the annual average increase rate of 1% (assuming). Heatwave response budget is replaced with disaster prevention/civil defense data	Statistical Office
	Heatwave budget ratio	0.04	-	Considering the ratio of the 2018 heatwave budget to the Daegu regional budget average	Statistics Office(Local budget), ratio assumed
	Heatwave budget increase policy	0.5	-	-	Assumption
	Employment rate	0.584	-	2011-2019 average	Statistical Office
	Local tax	-	-	Regional employment* Regional tax increase rate	
	Regional tax increase rate	0.1	-	Assuming an average of 10% increase in regional tax revenue from the previous year in 2011-2018	Statistical Office
	Growth rate of job creation support	0.1	-	Assume 10%	
	Economic activity participation rate	0.607	ratio	2011-2019 Daegu Metropolitan City Economic Activity Participation Rate Average	
	Increased amount of eco-friendly policy support	-	Bil. won	Heatwave response budget + (heat wave response budget * eco-friendly policy support rate)	
	Eco-friendly policy support rate	0.5	ratio		Assumption

Sector	Indicators	Parameter	Unit	Formula	Source
	Support rate of vulnerable groups in response to heatwaves	0.5	ratio	-	Assumption
	Support for vulnerable groups in response to heatwaves	-	Bil. won	Population of Vulnerable Classes* Increased amount of support for vulnerable groups in response to heatwaves	
	Increased amount of support for vulnerable groups in response to heatwaves	-	Bil. won	Heatwave response budget + (heat wave response budget * support rate for vulnerable groups in heatwave response)	
Industry/ Energy	L Fossil fuel energy consumption	-	1,000 toe	From 2011 to 2017, petroleum energy statistics, and after that, a 1% annual increase rate (assuming).	Energy statistics
	Fossil energy consumption	-	ratio	(Fossil energy consumption/energy consumption)* Growth rate of registered fossil fuel vehicles	
	Growth rate of registered fossil fuel vehicles	0.5	-	-	Assumption
	Growth rate of registered electric vehicles	0.1	ratio	-	Assumption
	Number of vehicle registrations	-	-	Fossil energy consumption + renewable energy consumption	
	Increased number of registered vehicles	0.02	each	2% increase per year	http://keva.or.kr (accessed June 8, 2020)
	Car exhaust emissions	-	-	Number of vehicle registrations + (number of vehicle registrations * increase rate of vehicle registrations)	
	Annual renewable energy penetration rate	0.0506	ratio	Daegu Metropolitan City's new and renewable energy penetration rate as of 2017 5.06%	Daegu City Hall/ Energy Industry Statistics/Regional Energy Consumption Status
	L Renewable energy consumption	-	1,000 toe	From 2011-2017, data from the National Statistical Office, and after that ,a lookup function in consideration of an annual 1% (assuming) reduction rate.	Statistical Office
	Renewable energy consumption	-	-	(L Renewable energy consumption/energy consumption) * Renewable energy policy share	

Sector	Indicators	Parameter	Unit	Formula	Source
	New and renewable energy policy	-	-	(Increased amount of eco-friendly policy support * Renewable energy consumption) * Renewable energy policy share	
	Share of new and renewable energy policies	1	ratio	-	Assumption
	Energy consumption	-	-	Electricity consumption per person * number of hot days	
	L Electricity consumption per person	-	-	From 2011 to 2019, data from the National Statistical Office, and after that, a lookup function in consideration of an annual 2% increase.	Statistical Office
	Annual average temperature	-	-	Fossil energy consumption* emission of automobile exhaust gas	
Agriculture and Forestry	Number of animals damaged by heatwave	-	-	Livestock*Livestock disease coefficient*Livestock mortality rate	
	Livestock	-	each	From 2011 to 2019, livestock trend data, and after that a lookup function assuming a 1% annual decrease	Livestock trends/Statistical Office
	Livestock disease coefficient	0.0008	-	The ratio of the number of infectious livestock outbreaks in Daegu city compared to the nation in 2019 applied	National livestock quarantine statistics service/Statistical on occurrence of legal livestock infectious diseases
	Livestock mortality	0.1224	ratio	Daegu Metropolitan City Average number of livestock mortality of cattle and pigs in 2011-2019 / Average number of domestic cattle, cows, and pigs in 2011-2019	Statistical Office, Livestock trends by year
	Livestock mortality damage	2389.09	Bil. won	Economic loss cost of cattle and pigs killed by Yeora Chae et al. (2016); Application of Economic Loss for Disposal of Cows and Pigs by Park Hyeon et al.	Chae, Mun, Kim and Lee et. al(2016); Park, Kim, Seo and Lee et al.(2005)
	Agricultural area	-	-	From 2011-2018, data from the National Statistical Office, and after that, a 1% reduction rate taking into account the 2011-2018 average	Statistical Office
	Damage to crops per unit area	0.00096	Bil. won	Damage recovery cost for agricultural land due to natural disasters/area of agricultural land	
	Reduction in agricultural area	-	ha	Agricultural area* (ratio of damaged area of crops + ratio of damaged area of forest fires)	

부록 2 •••••

모형개발 결과 수식

- (01) “1인당 의료비용”=L 1인당 의료비용(Time) (units: 십억 원)
- (02) “1인당 전력소비량” $\{[(2011, 0.005)-(2040, 0.02)], (2011, 0.00596), (2012, 0.00602), (2013, 0.00607), (2014, 0.006), (2015, 0.00605), (2016, 0.00619), (2017, 0.00625), (2018, 0.0064), (2019, 0.00658), (2020, 0.00674), (2021, 0.00692), (2022, 0.0071), (2023, 0.00728), (2024, 0.00748), (2025, 0.00767), (2026, 0.00787), (2027, 0.00807), (2028, 0.00828), (2029, 0.00849), (2030, 0.0087), (2031, 0.00893), (2032, 0.00916), (2033, 0.0094), (2034, 0.00964), (2035, 0.00989), (2036, 0.01016), (2037, 0.01043), (2038, 0.01072), (2039, 0.01102), (2040, 0.01133)\}$ (units: Dmnl)
- (03) GRDP 대비 지역예산=L 지역예산(Time)/“지역내총생산(GRDP)” (units: Dmnl)
- (04) L 1인당 의료비용 $\{[(2011, 0)-(2040, 20000)], (2011, 2522.73), (2012, 2611.77), (2013, 2737.43), (2014, 2904.1), (2015, 3105.77), (2016, 3424.76), (2017, 3674.86), (2018, 4044.15), (2019, 4309.04), (2020, 4591.29), (2021, 4892.02), (2022, 5212.44), (2023, 5553.86), (2024, 5917.63), (2025, 6305.24), (2026, 6718.23), (2027, 7158.28), (2028, 7627.14), (2029, 8126.72), (2030, 8659.02), (2031, 9226.19), (2032, 9830.5), (2033, 10474.4), (2034, 11160.5), (2035, 11891.5), (2036, 12670.4), (2037, 13500.3), (2038, 14384.6), (2039, 15326.8), (2040, 16330.7)\}$ (units: 십억 원)
- (05) L 가축수(2016, 400618), $\{[(2011, 200000)-(2040, 600000)], (2011, 428653), (2012, 493587), (2013, 500781), (2014, 422772), (2015, 505069), (2017, 371327), (2018, 317662), (2019, 348492), (2020, 345007), (2021, 341557), (2022, 338141), (2023, 334760), (2024, 331412), (2025, 328098), (2026, 324817), (2027, 321569), (2028, 318353), (2029, 315170), (2030, 312018), (2031, 308898), (2032, 305809), (2033, 302751), (2034, 299723), (2035, 296726), (2036, 293759), (2037, 290821), (2038, 287913), (2039, 285034), (2040, 282184)\}$ (units: 마리)
- (06) L 농경지면적 $\{[(2011, 6000)-(2040, 10000)], (2011, 8927), (2012, 9170), (2013, 8825), (2014, 8660), (2015, 8291), (2016, 9102), (2017, 8062), (2018, 7661), (2019, 7472), (2020, 7397), (2021, 7323), (2022, 7250), (2023, 7178), (2024, 7106), (2025, 7035), (2026, 6964), (2027, 6895), (2028, 6826), (2029, 6758), (2030, 6690), (2031, 6623), (2032, 6557), (2033, 6491), (2034, 6426), (2035, 6362), (2036, 6298), (2037, 6235), (2038, 6173), (2039, 6111), (2040, 6050)\}$ (units: ha)
- (07) L 신재생에너지 소비량 $\{[(2011, 0)-(2040, 300)], (2011, 208), (2012, 214), (2013, 124), (2014, 154), (2015, 160), (2016, 158), (2017, 159), (2018, 162), (2019, 165), (2020, 169), (2021, 172), (2022, 176), (2023, 179), (2024, 183), (2025, 186), (2026, 190), (2027, 194), (2028, 198), (2029, 202), (2030, 206), (2031, 210), (2032, 214), (2033, 218), (2034, 223), (2035, 227), (2036, 232), (2037, 236), (2038, 241), (2039, 246), (2040, 251)\}$ (units: Dmnl)

- (08) L 온열질환자수 $\{[(2011, 0)-(2040, 200)]$, (2011, 27), (2012, 43), (2013, 33), (2014, 21), (2015, 52), (2016, 38), (2017, 28), (2018, 122), (2019, 124), (2020, 127), (2021, 129), (2022, 132), (2023, 135), (2024, 137), (2025, 140), (2026, 143), (2027, 146), (2028, 149), (2029, 152), (2030, 155), (2031, 158), (2032, 161), (2033, 164), (2034, 167), (2035, 171), (2036, 174), (2037, 178), (2038, 181), (2039, 185), (2040, 189)) (units: Dmnl)
- (09) L 지역예산 $\{[(2011, 8000)-(2040, 20000)]$, (2011, 8158.46), (2012, 8787.07), (2013, 9935.22), (2014, 10062.2), (2015, 11321.2), (2016, 11918.2), (2017, 12463.2), (2018, 12587.8), (2019, 12713.7), (2020, 12840.8), (2021, 12969.2), (2022, 13098.9), (2023, 13229.9), (2024, 13362.2), (2025, 13495.8), (2026, 13630.8), (2027, 13767.1), (2028, 13904.7), (2029, 14043.8), (2030, 14184.2), (2031, 14326.1), (2032, 14469.3), (2033, 14614), (2034, 14760.2), (2035, 14907.8), (2036, 15056.8), (2037, 15207.4), (2038, 15359.5), (2039, 15513.1), (2040, 15668.2)) (units: 십억 원)
- (10) L 취약계층 인구 $\{[(2011, 100000)-(2040, 200000)]$, (2011, 167493), (2012, 167393), (2013, 167273), (2014, 166921), (2015, 166474), (2016, 166156), (2017, 165745), (2018, 165015), (2019, 163776), (2020, 162975), (2021, 162020), (2022, 161038), (2023, 160056), (2024, 159098), (2025, 158167), (2026, 157266), (2027, 156392), (2028, 155545), (2029, 154709), (2030, 153868), (2031, 153020), (2032, 152160), (2033, 151279), (2034, 150368), (2035, 149424), (2036, 148440), (2037, 147413), (2038, 146339), (2039, 145218), (2040, 144053)) (units: Dmnl)
- (11) L 폭염대응예산 시나리오 $\{[(2011, 0)-(2040, 20)]$, (2011, 1.748), (2012, 2.229), (2013, 4.113), (2014, 6.122), (2015, 7.004), (2016, 6.912), (2017, 8.768), (2018, 8.856), (2019, 8.944), (2020, 9.034), (2021, 9.035), (2022, 9.125), (2023, 9.216), (2024, 9.217), (2025, 9.309), (2026, 9.402), (2027, 9.403), (2028, 9.497), (2029, 9.592), (2030, 9.593), (2031, 9.689), (2032, 9.786), (2033, 9.787), (2034, 9.885), (2035, 9.984), (2036, 9.985), (2037, 10.085), (2038, 10.185), (2039, 10.186), (2040, 10.288)) (units: Dmnl)
- (12) L 폭염시나리오 $\{[(2011, 0)-(2040, 60)]$, (2011, 29), (2012, 30), (2013, 54), (2014, 22), (2015, 21), (2016, 32), (2017, 33), (2018, 40), (2019, 29), (2020, 29.6), (2021, 30.2), (2022, 30.8), (2023, 31.4), (2024, 32), (2025, 32.7), (2026, 33.3), (2027, 34), (2028, 34.7), (2029, 35.4), (2030, 36.1), (2031, 36.8), (2032, 37.6), (2033, 38.3), (2034, 39.1), (2035, 39.8), (2036, 40.6), (2037, 41.5), (2038, 42.3), (2039, 43.1), (2040, 44)) (units: 일)
- (13) L 화석에너지 소비량 $\{[(2011, 0)-(2040, 5000)]$, (2011, 1761), (2012, 1583), (2013, 1581), (2014, 1622), (2015, 1662), (2016, 1712), (2017, 2844), (2018, 2901), (2019, 2959), (2020, 3018), (2021, 3078), (2022, 3140), (2023, 3203), (2024, 3267), (2025, 3332), (2026, 3399), (2027, 3467), (2028, 3536), (2029, 3607), (2030, 3679), (2031, 3753), (2032, 3828), (2033, 3904), (2034, 3982), (2035, 4062), (2036, 4143), (2037, 4226), (2038, 4311), (2039, 4397), (2040, 4485)) (units: Dmnl)
- (14) 가축 = INTEG (가축증가량, 428653) (units: 마리)
- (15) 가축증가량 = L 가축수(Time) (units: 마리)

- (16) 가축질병계수=폭염일수×0.00078 (units: 일)
- (17) 가축폐사율=0.1224 (units: Dmnl)
- (18) 가축폐사피해액= 0.00238909 (units: 십억 원)
- (19) 가축피해액=가축폐사피해액×폭염피해 가축수 (units: 십억 원×마리×일)
- (20) 경제활동참가율=0.607 (units: Dmnl)
- (21) 고용률=0.584 (units: Dmnl)
- (22) 농경지면적=L 농경지면적(Time) (units: ha)
- (23) 농경지면적감소분=농경지면적×(농작물 피해면적 비율+산불피해면적비율) (units: ha×일)
- (24) 농림업 생산액=2712.29 (units: 십억 원)
- (25) 농산물피해액=가축피해액+농작물 피해액 (units: 십억 원)
- (26) 농작물 피해면적 비율=폭염일수×1.4107 (units: 일)
- (27) 농작물 피해액=단위면적당 농작물 피해액+(단위면적당 농작물 피해액×농작물 피해면적 비율) (units: 십억 원×일)
- (28) 단위면적당 농림업 생산액=농림업 생산액/농경지면적감소분 (units: 십억 원/Year)
- (29) 단위면적당 농작물 피해액=0.00096 (units: 십억 원)
- (30) 단위면적당 산림피해액=1.4484 (units: 십억 원)
- (31) 산림피해액=단위면적당 산림피해액×산불피해면적비율 (units: 십억 원)
- (32) 산불피해면적비율=폭염일수×0.00096 (units: 일)
- (33) 신재생에너지 소비=(L 신재생에너지 소비량(Time)/에너지 소비) (units: 1/일)
- (34) 신재생에너지 정책=(친환경정책지원액 증가량×신재생에너지 소비)×신재생에너지 정책 비중 (units: 일×십억 원)
- (35) 신재생에너지 정책 비중=1 (units: Dmnl)
- (36) 에너지 소비="1인당 전력소비량"(Time)×폭염일수 (units: 일)
- (37) 연평균 기온=화석에너지 소비×자동차 배기가스 방출 (units: 1/일)
- (38) 온열질환자 사망률=0.01 (units: 1/Year)
- (39) 온열질환자수= INTEG (온열질환자수 감소+온열질환자수 증가, 27) (units: 명)
- (40) 온열질환자수 감소=온열질환자수×온열질환자 사망률 (units: 명/Year)
- (41) 온열질환자수 증가=L 온열질환자수(Time)×온열질환자수 증감분 (units: 1/(일×명×Year))
- (42) 온열질환자수 증감분=연평균 기온/취약계층 폭염대응력 (units: 1/(Year×일×명))
- (43) 인적피해수=온열질환자수 (units: 명)
- (44) 인적피해액="1인당 의료비용"×인적피해수 (units: 십억 원×명)
- (45) 일자리 창출 지원 증가율=0.1 (units: Dmnl)
- (46) 일자리 창출 지원액=신재생에너지 정책×일자리 창출 지원 증가율 (units: 십억 원×일)

- (47) 자동차 등록대수 증가율=0.02 (units: Dmnl)
- (48) 자동차 배기가스 방출=자동차등록대수×자동차 등록대수 증가율 (units: 1/일)
- (49) 자동차등록대수=전기자동차 등록대수+화석연료자동차 등록대수 (units: 1/일)
- (50) 자연재해 농림업 피해액=농산물피해액+산림피해액 (units: 십억 원)
- (51) 재난복구비용=폭염 총 피해액 (units: 십억 원)
- (52) 전기자동차 등록대수=신재생에너지 정책+(신재생에너지 정책×전기자동차 등록대수 증가율) (units: Dmnl)
- (53) 전기자동차 등록대수 증가율=0.1 (units: Dmnl)
- (54) 지역고용=일자리 창출 지원액×고용률 (units: Dmnl)
- (55) 지역내총생산 소비량=“지역내총생산(GRDP)”-폭염대응예산 소모액 (units: 십억 원)
- (56) 지역내총생산 증가량=단위면적당 농림업 생산액+지역세수 (units: 십억 원/Year)
- (57) “지역내총생산(GRDP)”= INTEG (지역내총생산 증가량-지역내총생산 소비량, 4.26358e+10) (units: 십억 원)
- (58) 지역세수=지역고용×지역세수증가율 (units: Dmnl)
- (59) 지역세수증가율=0.1 (units: Dmnl)
- (60) 취약계층 인구=L 취약계층 인구(Time) (units: 명)
- (61) 취약계층 폭염대응력=폭염대응 취약계층 지원액×경제활동참가율 (units: Year×명)
- (62) 친환경정책 지원률=0.5 (units: Dmnl)
- (63) 친환경정책지원액 증가량=폭염대응예산×친환경정책 지원률 (units: 십억 원)
- (64) 폭염 총 피해액=인적피해액+자연재해 농림업 피해액 (units: 십억 원)
- (65) 폭염대응 취약계층 지원률=0.5 (units: Dmnl)
- (66) 폭염대응 취약계층 지원액=취약계층 인구×폭염대응 취약계층 지원액 증가량 (units: 십억 원×명)
- (67) 폭염대응 취약계층 지원액 증가량=폭염대응예산×폭염대응 취약계층 지원률 (units: 십억 원)
- (68) 폭염대응예산= INTEG (폭염대응예산 편성액-폭염대응예산 소모액, 1.748e+06) (units: 십억 원)
- (69) 폭염대응예산 소모액=폭염대응예산-재난복구비용 (units: 십억 원)
- (70) 폭염대응예산 편성액=L 폭염대응예산 시나리오(Time)+폭염지원예산규모 (units: 십억 원)
- (71) 폭염예산비율=0.04 (units: Dmnl)
- (72) 폭염일수=L 폭염시나리오(Time)×폭염일수 증가율 (units: 일)
- (73) 폭염일수 증가율=0.01 (units: Dmnl)
- (74) 폭염지원예산규모=GRDP 대비 지역예산×폭염예산비율 (units: 십억 원)
- (75) 폭염피해 가축수=가축×가축질병계수×가축폐사율 (units: 마리×일)
- (76) 화석에너지 소비=L 화석에너지 소비량(Time)/에너지 소비 (units: 1/일)
- (77) 화석연료자동차 등록대수=화석에너지 소비×화석연료자동차 등록대수 증가율 (units: 1/일)
- (78) 화석연료자동차 등록대수 증가율=0.5 (units: Dmnl)