

2022-CR-03

작은연구 좋은서울 22-14

서울시 폭염 및 미세먼지 노출 위험도 분석

성기진



서울시 폭염 및 미세먼지 노출 위험도 분석



연구책임

성기진 텍사스대학교 오스틴 도시정보연구실 박사 후 연구원

연구진

최승준 텍사스대학교 오스틴 공동체 및 지역계획 박사과정



이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

목차

01 서론	7
1_연구 배경 및 목적	7
2_연구 내용 및 방법	12
02 스마트서울 도시데이터 센서 비교분석	19
1_S-DoT 센서와 에어코리아 도시 대기 측정망의 비교	19
2_서울시 전역 대기오염 비교분석	20
3_서울시 구별 대기오염 비교분석	21
4_소결	23
03 S-DoT 데이터를 이용한 폭염 및 미세먼지 위험 분석	25
1_기술 통계(Descriptive Statistics)	25
2_서울시 기후 위험요소, 생활인구 시간대별 평균 패턴 분석	26
3_서울시 기후 위험요소 공간 분석	29
4_소결	30
04 생활인구 데이터를 이용한 연령별 기후위험도 분석	31
1_Z-Score 산출 및 위험요소 맵핑 분석 방법	31
2_폭염, 미세먼지, 초미세먼지의 연령별 기후위험도 분석	32
3_인구사회학적, 도시환경 관련 변수의 기술 통계	36
4_연령대별 기후위험 노출도와 인구학적·도시환경 변수와의 연관성	37
5_소결	39

05 정책 제언	41
1_현 기후변화 관련 계획 검토 및 연계성	41
2_폭염과 미세먼지 저감을 위한 기후 정책 제언	44
3_기후변화 대응을 위한 빅데이터의 활용방안	58
참고문헌	62

표 목차

[표 1-1] 데이터 수집 일자	18
[표 3-1] 데이터 수집 일자 [표 1-1] 기준 기술 통계	25
[표 4-1] T-검정 수집 변수	37
[표 4-2] T-검정 수집 결과	39
[표 5-1] 폭염 및 미세먼지 관련 국가 기후변화 리스트 목록	42
[표 5-2] 연도별 아토피 천식 안심학교 현황 (단위 : 개소)	54

그림 목차

[그림 1-1] 서울 폭염 일수와 여름철 평균기온(1919-2022)	8
[그림 1-2] 서울 미세먼지 주의보 발령 일수	9
[그림 1-3] 연구 내용의 구성 및 방법	14
[그림 1-4] 서울시 행정동별 S-DoT 설치 현황	14
[그림 1-5] 주의보 발령일 기준 서울시 행정동별 시간대별 생활인구 합계	15
[그림 1-6] 주의보 발령 일자 서울시 행정동별 시간대별 연령별 생활인구(%)	16
[그림 1-7] 주의보 발령 일자 서울시 평균 온도, 미세먼지, 초미세먼지 시계열 분석	17
[그림 2-1] 버퍼(Buffer) 분석 예시: 에어코리아 반경 내 위치하는 S-DoT 추출	19
[그림 2-2] 서울시 평균 미세먼지 측정 비교 분석	20
[그림 2-3] 서울시 평균 초미세먼지 측정 비교 분석	21
[그림 2-4] 서울시 구별 미세먼지 측정 비교 분석	22
[그림 2-5] 서울시 구별 초미세먼지 측정 비교 분석	22
[그림 3-1] 서울시 기온, 미세먼지, 초미세먼지 시간대별 평균 시계열 분석	27
[그림 3-2] 서울시 온도, 미세먼지, 초미세먼지 생활인구별, 시간대별 평균 시계열 분석	28
[그림 3-3] 서울시 평균 온도, 미세먼지, 초미세먼지 공간 분포	29
[그림 3-4] 서울시 평균 온도, 미세먼지, 초미세먼지 피크아워 시간대의 핫스팟 분석 결과	30
[그림 4-1] 서울시 연령별 기후위험도 분석 결과	34
[그림 4-2] 서울시 연령별 공통된* 기후위험도 분석 결과	35
[그림 5-1] 서울시 창신동과 고령 인구의 폭염 기후위험 노출도	48
[그림 5-2] 서울시 창신동과 무더위쉼터 운영 현황	49
[그림 5-3] 창신1동과 가로 경관	50

[그림 5-4] 창신2동과 가로 경관	51
[그림 5-5] 창신3동과 가로 경관	51
[그림 5-6] 대기오염과 서울 시 내 초등학교와 중학교 운영 현황	55
[그림 5-7] 이동형 센서 및 통합 데이터를 기반한 동적 열지도	60



01. 서론

1_연구 배경 및 목적

1) 폭염 및 고농도 미세먼지 발생 및 건강 위험도 증가

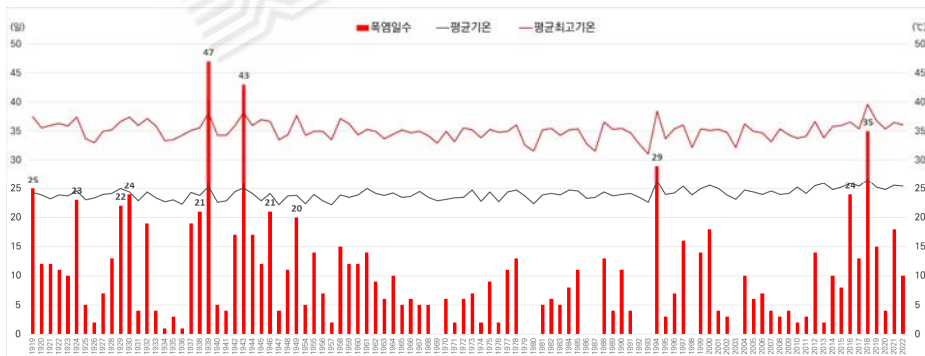
기후변화로 인하여 폭염과 미세먼지의 빈도와 강도가 증가하고 있는 가운데, 서울 시민들의 생활환경과 건강은 지속적으로 위협을 받고 있다. 이로 인해, 노년층과 어린이 등 폭염과 미세먼지에 취약한 사회계층의 안전에 대한 우려가 점차 커지고 있는 실정이다. 반복되고 일상화되고 있는 여름철 폭염과 겨울과 봄철의 미세먼지는 우리나라만의 문제가 아니며, 국내외적인 차원에서 다양하고 지속적인 노력이 필요한 상시적 재난(“New Normal”)으로 인식되고 있다(Sima et al., 2017; 김창섭, 2018; 안현찬 외, 2021). 따라서, 기후변화의 강도를 완화하고 그 영향력을 감소시키고자 하는 전 지구적 차원의 접근과 더불어, 지역적 차원의 움직임 또한 꾸준히 요구되고 있는 실정이다.

극심한 폭염으로 인한 전 세계적인 인명피해는 평등하게 적용되지 않으며, 사회경제적 취약계층일수록 고온 노출에 대한 취약성 때문에 더 가혹한 피해를 받게 된다(Inostroza et al., 2016; Kim et al., 2017; Wilson and Chakraborty, 2019). 마찬가지로, 미세먼지와 초미세먼지에 대한 노출과 피해도 사회적 취약계층에게 더 불리하다는 연구 결과가 발표되고 있다(Ho et al., 2018). 즉, 기존 연구에서 급성 재난(acute shocks) 위주의 재난위험관리 차원에서의 사회 취약계층으로 분류되어오던 노년층, 여성, 장애인, 무직자, 저소득층, 소외계층 등이 미세먼지와 같은 만성적인 재난(Chronic stress)에 대해서도 더 취약하다고 밝혀지고 있는 추세이다(Clougherty and Kubzansky, 2009; Ho et al., 2018; Makri and Stilianakis, 2008; Martins et al., 2004). 따라서, 폭염과 미세먼지의 분포 양상을 정확하게 진단하고, 기후 취약계층의 노출을 시공간적으로 파악하여 그 피해 강도를 완화시키려는 노력은 매우 중요하다.

이러한 취지에서, 본 연구는 서울 전역에 분포되어있는 IoT 환경 센서를 활용하여 고해상도의 기후위험 요소 파악을 일차 목적으로 하며, 이를 시공간적으로 분석해 연령대별 생활인구 빅데이터와 접목시켜 기후 취약계층의 노출 실태를 분석함을 이차 목적으로 한다. 마지막으로, 시간대별, 지역별, 연령대별 기후 취약계층의 실태를 바탕으로 서울시의 폭염, 미세먼지, 초미세먼지 대비를 위한 정책적인 제안 및 IoT 환경 센서의 추후 활용방안에 대한 제언을 논의하고자 한다.

2) 서울특별시 폭염과 미세먼지 발생 현황

폭염은 “매우 심한 더위”를 의미하며, 지속적인 폭염은 온열질환 발생, 야외근로자 사망 등 생활 전반에 걸쳐 다양한 피해를 발생시킬 수 있다는 점에서 자연재해로 분류될 수 있다(기상청, 2021). 기상청은 일 최고 기온 33℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 폭염주의보를 발령하며, 35℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 폭염 경보를 발령하고 있다. 2020년 서울지역 폭염주의보 발령일은 총 17일로, 6월 초부터 8월 말까지 집중되어 있다. 이처럼 서울지역은 지난 30년 동안 여름철 기온이 지속적으로 높아지고 있으며, 특히 2021년 7월에는 극심한 폭염으로 평균 최고기온이 32.4도를 기록하며 27년 만에 평년 최고기온을 경신하였다(그림 1-1]. 이에 따라 열사병, 열탈진, 열경련, 열 실신, 열 부종 등 다양한 온열질환의 피해도 급증하고 있는 추세이며, 그 피해의 30.8%가 60대 이상 고령층에 집중되어 있다 (질병관리청, 2020).

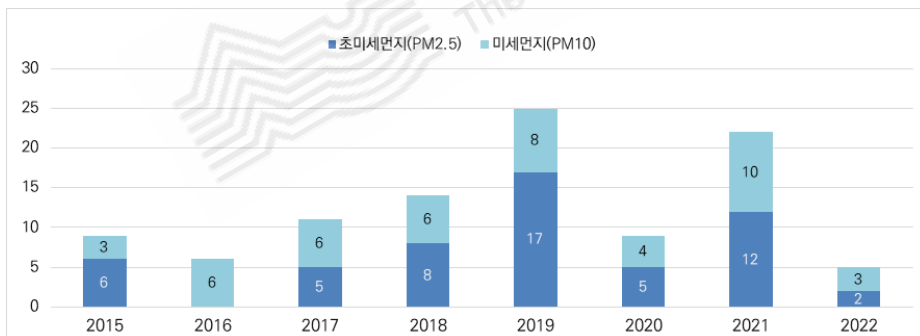


자료: 기상자료개방포털

[그림 1-1] 서울 폭염 일수와 여름철 평균기온(1919-2022)

미세먼지는 아황산가스, 일산화탄소, 질소산화물, 납, 오존 등을 포함하는 대기오염 물질로, PM10은 자동차, 공장, 조리과정 등에서 발생하여 대기 중에 장기간 떠다니는 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세한 먼지를 의미하며, PM2.5는 연소 입자, 금속, 유기화합물 등 직경 $2.5\mu\text{m}$ 보다 작은 입자를 말한다.

미국 보건영향연구소(HERI)에 따르면, 한국의 초미세먼지(PM2.5) 농도는 평균 $29\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 세계보건기구에서 권장하는 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 3배에 다다르며, OECD 35개국 중에서 두 번째로 대기오염도가 높다(정종철 and 이상훈, 2018). 서울시의 평균적인 연간 초미세먼지·미세먼지 농도는 2000년대 초 이후 대체로 감소하고 있다는 의견도 있으나, 2019년 초미세먼지 농도가 최근 5년 중 가장 짙게 나타났고, 초미세먼지의 수준이 '나쁨'을 기록한 일수도 가장 많았다(고영득, 2019). 이와 같은 우려를 반영하듯, 최근 3년간 미세먼지로 인한 건강 악화와 생활 갈등 발생과 관련한 민원이 매년 2배씩 증가해 왔고, 정부 지원이 시급하다고 여겨지는 대상은 '일반 국민'(75.6%), '영유아·어린이'(17.4%), '노인·장애인'(5.9%) 순으로 나타났다(김유정, 2019). 따라서, 서울시의 폭염, 미세먼지, 초미세먼지에 대한 강도와 빈도는 해가 갈수록 증가하고 있으며, 기후위험요인은 서울 시민 전반의 건강한 생활과 일상의 환경을 위협하는 원인으로서 그 중요성이 더해지고 있다.



[그림 1-2] 서울 미세먼지 주의보 발령 일수

자료: 에어코리아

3) 스마트서울 도시데이터 센서와 서울 생활인구 데이터의 기후변화 연구 활용 가능성

2020년 4월부터 서울시 전역에 설치된 도시데이터 센서 (S-DoT)는 현재 1,100대로 미세먼지, 온도, 습도, 조도, 소음, 진동, 자외선, 풍향, 풍속 등의 다양한 환경정보를 2분

단위로 제공하고 있다. S-DoT은 2022년까지 약 2,500개의 설치를 목표로 하고 있으며, 주로 CCTV 지주나 주민센터, 건물 등에 설치되고 있다. 기존의 도심 열섬 현상이나 폭염과 관련한 지역 연구는 서울시 구별 약 1개씩 28개소에 설치된 국가 자동 기상관측 장비(AWS)를 활용해왔지만, 관측지점의 수가 현저히 적은 한계가 있었다. 반면, 서울지역의 환경 센서의 설치는 (1) 보다 상세하게 공간적인 특성을 파악하고 조밀한 시간 단위로 측정 정보를 제공한다는 점, (2) 비교적 도시민들의 생활에 인접하게 설치되어 직접적인 체감환경과 유사한 환경정보를 얻을 수 있다는 점에서 기존의 기후 센서에 대응하여 그 활용 가능성이 크게 기대된다. 앞서 말한 만성적인 재난의 성격을 갖는 폭염과 미세먼지의 연구에서도 S-DoT 센서의 빅데이터를 활용하게 되면, 시공간적으로 온도, 습도, 미세먼지의 고해상도 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 실질적으로 S-DoT 센서를 활용한 기후연구는 아직 초기 단계에 있으며, 보다 다양한 방식으로의 활용이 요구된다.

서울시의 주민등록인구는 감소 추세이나 경제활동인구와 주간인구는 증가 추세로 행정 수요 파악을 위한 인구 추계 파악을 위해 서울시는 KT와 2017년 4월 업무협약을 체결하였다. 이후 서울시 공공빅데이터와 KT 통신데이터로 측정한 서울 생활인구 데이터를 서울 열린데이터광장에 공개하고 있다. 서울 생활인구란 ‘서울시가 보유한 빅데이터와 KT의 통신데이터로 측정한 특정 시점에 서울시 특정 지역에 존재하는 모든 인구’를 의미한다. 서울 생활인구는 KT의 LTE 시그널 데이터를 이용하며 KT 고객의 시각별 존재 기지국 단위의 생활인구 추정모형에 따른다(서울 생활인구추계 매뉴얼, 2018). 서울 생활인구 데이터는 1) 특정 시점에 특정 지역에 밀집하는 인구 분석(이지혜 and 김형중, 2019) 그리고 2) 모바일 통신데이터 기반 유동인구 데이터로서 시공간(spatiotemporal) 교통 수요 분석(Lee et al., 2021)에 응용되었다는 점에서 서울에서 실제 활동하는 유동인구와 기후위험 요소의 시공간적 상관관계 파악에 응용될 수 있다.

기후위험 요소로서 폭염과 미세먼지는 사회 구성원 전반에 동일한 피해를 입히기보다는 사회적 약자, 기후 취약계층, 취약지역에 집중적으로 그 빈도와 강도를 달리하여 영향을 미친다. 따라서 기후 불평등의 차원에서 사회 정책적인 접근과 대응이 요구되며, 자연적인 재해의 차원을 넘어서 사회적 재해로서의 인식의 전환이 필요하다.

4) 기존의 연구사례 및 본 연구의 차별성

폭염은 인간의 건강에 직접적인 영향을 미치며, 고온에 장기간 노출되면 열경련, 열실신,

열사병, 사망 등 온열 질환의 위험인자로서 작용한다(Kim et al., 2014; Kim et al., 2016; Lee et al., 2016; Luber and McGeehin, 2008). 그 심각성에도 불구하고, 열과 관련된 질병과 사망률은 불평등하게 발생하며, 사회·경제적으로 취약한 집단은 일반적으로 고온 노출에 대처할 능력이 부족하기 때문에 더 위험하다(Inostroza et al., 2016; Kim et al., 2017; Wilson and Chakraborty, 2019). 연령은 열 노출 민감도를 높이는 중요한 요인이다. 예를 들어, 노인이 만성질환을 앓고 있거나 체온증가에 대한 조절 능력을 상실한 경우(Basu and Ostro, 2008), 영유아, 아동 및 청소년의 민감한 대사활동 등은 성인보다 더 높은 열을 발생시키고 심박출량을 낮춘다.(Krous et al., 2001).

폭염과 유사하게, 기존 미세먼지의 연구에서도 고농도 미세먼지에 의한 노출과 손상이 사회적 약자 그룹에 더 악영향을 미친다는 것을 입증했다(Ho et al., 2018). 또한 급성 재난의 상황에 더 초점이 맞추어졌던 재해관리 연구들과 마찬가지로, 만성적인 스트레스에서도 취약계층에 대한 연구들이 다루어지고 있다(Clougherty and Kubzansky, 2009; Makri and Stilianakis, 2008; Martins et al., 2004). 국내 대기질 관련 취약성 평가 연구들은 기저질환 인구나 노인 인구를 대상으로 하는 경우가 많았다(Lee et al., 1999; Lee et al., 2002). 환경위험에 관한 한국의 계획정책은 연령과 소득에 더 중점을 두고 있지만, 유소년층 인구의 대기오염 농도 취약성에 대한 연구들도 입증되고 있는 실정이다(Lee et al., 1999; Lee et al., 2002).

최근 들어 도시 센서(Urban Sensor)를 이용한 극한기후 노출도 측정의 필요성이 대두되고 있다. 열섬 연구에 있어서도, 고밀도 센서를 통한 열섬의 분석이 매우 유용하다는 평가가 있으며(Smoliak et al., 2015), 더불어 다양하고 이질적인 도시 문제를 해결하기 위해서는 보다 정밀한 도시 센서가 필요하다는 문제점이 제기되었다(Mueller et al., 2013). 이에 빅데이터의 활용은 고해상도의 도시환경 측정을 가능하게 하고, 취약계층의 시공간적 분포를 파악할 수 있도록 도와준다는 점에서 그 가능성을 열어준다. 또한 생활인구 데이터를 이용한 연구들은 인구 이동과 이동패턴(Song et al., 2010), 교통(Lee et al., 2021a; Song et al., 2010; Chen and Yeh, 2022), 상권의 최적화(Cho and Lee, 2021), 도시시설의 수요(Baz-Lomba et al., 2019), 근린지역의 활력(Kang, 2020; Barbour et al., 2019)과 관련한 연구들이 주를 이루어왔으나 기후환경 연구에서의 생활인구 데이터의 활용은 아직 미비한 실정이다.

특히, S-DoT의 환경정보를 통해 폭염이나 미세먼지의 분포를 공간 정보를 바탕으로 분석하고자 하는 시도는 있으나, 이를 생활인구 빅데이터와 접목시켜 실질적인 취약집단의

시공간적 노출을 분석한 연구는 부족한 실정이다. 즉, 환경정보 빅데이터인 S-DoT 데이터와 인구학적 빅데이터인 생활인구 데이터를 함께 활용하여 사회적 재해의 측면에서 폭염과 미세먼지 기후 취약성을 고해상도로 진단해보는 시도는 아직 없었다.

따라서, 본 연구는 서울시민들이 일상적 재난으로서의 폭염과 미세먼지에 주로 어떤 집단이, 어느 시간대와 지역에서 영향을 받게 되는지를 확인하고, 이를 통해 정책적인 접근과 대응을 뒷받침하기 위한 실증적인 연구자료 및 기초 데이터를 제공한다는 점에 의의를 둔다. 또한, 생활인구 데이터를 활용하여 취약집단의 폭염, 미세먼지, 초미세먼지의 노출 실태를 시간대별, 지역별로 정확하게 파악하여 맞춤형 정책 제안에 기반이 될 수 있는 기초자료를 마련할 것으로 기대된다.

2_연구 내용 및 방법

1) 연구 내용의 구성 및 방법

(1) 1단계: 스마트서울 도시데이터 센서(S-DOT)와 에어코리아(AirKorea) 도시대기 측정망 상호비교

본 연구의 1단계에서는 서울 시내 설치된 에어코리아 도시대기 측정망과 스마트서울 도시데이터 센서로 측정된 미세먼지와 초미세먼지 값 비교를 통한 상호검증을 실시하고자 한다. 또한 추후 스마트서울 도시데이터 센서 활용에 있어 에어코리아 도시대기 측정망으로부터의 최적의 인접 거리 반경을 제안하고자 한다.

(2) 2단계: 스마트서울 도시데이터 센서(S-DOT)를 활용한 서울지역의 폭염, 미세먼지, 초미세먼지의 시공간적 패턴 분석

본 연구는 서울 전역에 설치된 S-DoT 환경 센서로 각 기후위험 요소의 주의보 및 경보가 발령된 날들의 평균적인 시공간 패턴을 분석하는 것을 목표로 한다. 따라서, 폭염주의보, 미세먼지주의보, 초미세먼지주의보 발령일의 분석을 통해, 위험요소의 강도가 심한 날들의 피크 시간대 및 공간적인 편차를 확인한다. 시계열 및 공간 분석을 위한 데이터 시각화는 Matplotlib, Seaborn과 같은 파이썬 라이브러리와 Tableau Desktop, ArcMap, ArcGIS Pro의 활용한다.

(3) 3단계: 폭염, 미세먼지, 초미세먼지의 피크 시간대의 지역별 노출 실태 파악을 위한 공간(GIS) 및 핫스팟 분석

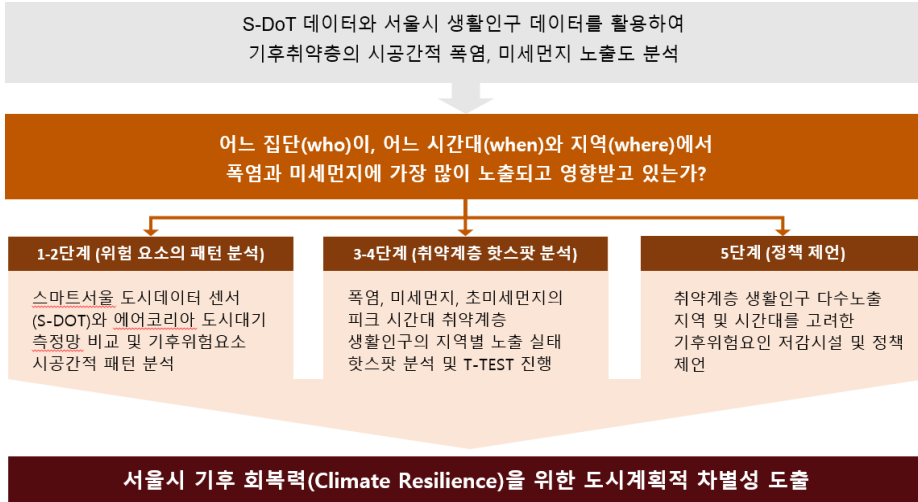
3단계에서는 기초통계를 바탕으로 지역별 평균 폭염, 미세먼지, 초미세먼지 공간 분포 양상을 조사하고자 한다. 생활인구 빅데이터는 연령대별, 성별 시공간 분석이 가능하다는 점에서, 앞서 2단계에서 추출한 각 기후 위험요소(폭염, 미세먼지, 초미세먼지)의 피크 시간대에 어떤 취약집단이 어느 지역에서 노출되는지를 분석하기 위해, 기본 GIS 분석 툴과 핫스팟 분석(Hot Spot Analysis)을 활용할 것이다.

(4) 4단계: 서울시 연령별 폭염, 미세먼지, 초미세먼지 기후위험도 분석 및 특징 검토

4단계에서는 Z-score 방법을 사용한 유소년, 노동, 고령 인구별 폭염, 미세먼지, 초미세먼지 기후위험도 공간 분석을 진행한다. 추가적으로 연령별 공통된 기후위험도(폭염, 미세먼지, 초미세먼지) 파악을 위한 공간 분석을 진행한다. 이후, 독립 T-검정 실시를 통한 연령별 가장 높은 기후위험 지역과 안정된 지역 사이의 인구사회학적, 공원 녹지, 도시 인프라 특징을 비교한다. 마지막으로 사회적 취약계층(독거노인, 기초생활수급자, 장애인, 소년가장, 1인가구)과 파악된 연령별 기후위험 지역 간의 연관 관계 및 연령별 기후위험도 특징을 검토하고자 한다.

(5) 5단계: 취약계층 생활인구 다수노출 지역 및 시간대를 고려한 기후위험 요인 저감시설 및 정책 제언

5단계에서는 지역별, 취약집단별 기후 취약성 분석과 가로 경관 분석을 통해 기후위험 요인을 저감할 수 있는 실증적인 정책 제안과 계획방안을 도출한다. 또한 비교적 최근에 서야 활용되고 있는 S-DoT 환경 센서가 도시회복력(Urban Resilience) 증진을 위하여 기초자료로서 어떻게 활용할 수 있을지에 대한 담론을 논의한다. 이후 선행연구 검토와 향후 스마트서울 도시데이터 센서 설치계획에 비추어 분석된 기후 위험지역의 위험요인을 감소시킬 수 있는 정책을 제언한다. 마지막으로, 현재 실행되고 있는 서울의 기후위험 요소 저감시설의 현황과 한계점을 알아보고, 서울 시정에 반영될 수 있는 해외사례를 살펴보고, 이를 바탕으로 한 맞춤형 대안 방안에 대한 논의하고자 한다.

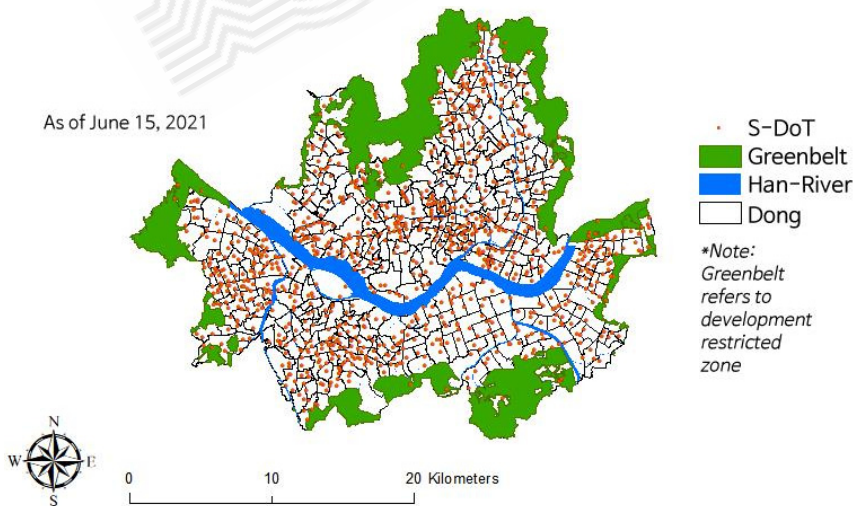


[그림 1-3] 연구 내용의 구성 및 방법

2) 연구 대상 및 시기

(1) 공간적 범위: 서울시 전역 424개 행정동 (2019년 기준)

서울시 전역에는 S-DoT이 고루 분포하며 2021년 6월 15일 자 기준 서울시 외곽 지역에 설치된 S-DoT을 제외 총 1,060개의 환경정보 수집이 가능한 S-DoT이 운용 중에 있다.



[그림 1-4] 서울시 행정동별 S-DoT 설치 현황

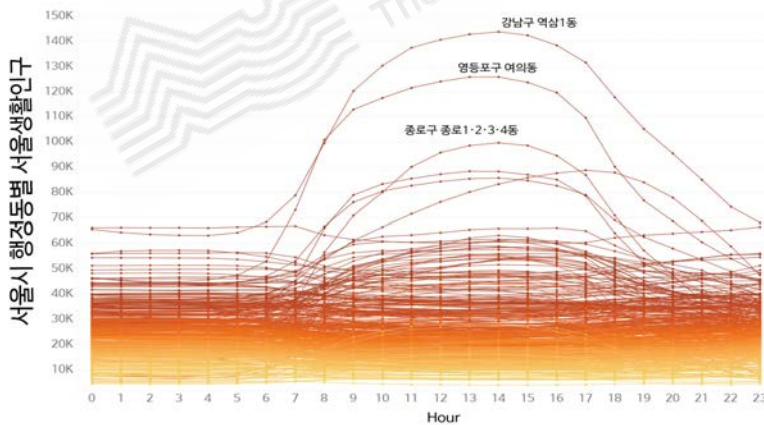
(2) 시간적 범위

2020년 4월 1일 ~ 2021년 3월 31일 사이 발령된 폭염주의보, 미세먼지주의보, 초미세먼지주의보 발령일을 대상으로 한다. 해당 기간 중 미세먼지주의보는 총 17일, 미세먼지주의보는 6일, 초미세먼지주의보는 총 20일이 발령했다. 그러나 S-DoT 데이터 및 서울시 생활인구 데이터의 누락으로 미세먼지주의보 발령일 중 1일 치, 초미세먼지 주의보 발령일 중 3일 치는 본 연구의 시간적 범위에 포함하지 않는다.

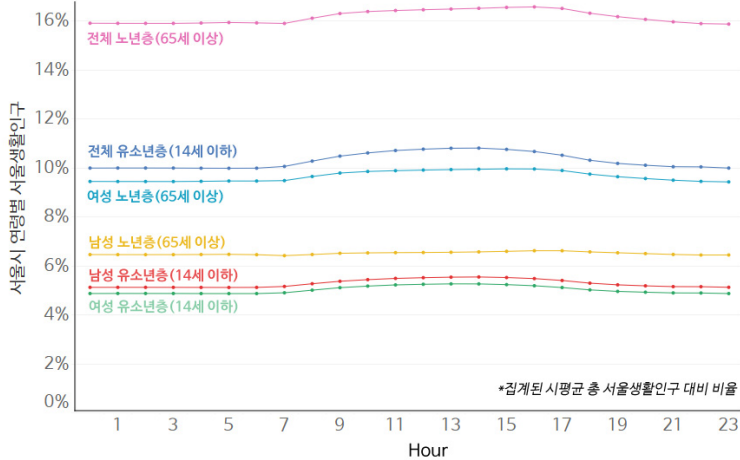
(3) 연구 대상: 주의보 발령일 기준 서울시 전역의 행정동별 실시간 생활인구

폭염, 미세먼지, 초미세먼지 주의보 발령일 기준 수집된 시 평균 행정동별 생활인구를 분석했을 때 서울 생활인구 집중 양상은 행정동별로 차이가 나타난다. 특히 인구가 집중되는 출퇴근 시간 전후 러시아워(오전 8시, 오후 6시)를 기준으로 서울시 도심지역(GBD·YBD·CBD)의 행정동(강남구 역삼1동, 영등포구 여의동, 종로구 종로 1·2·3·4동)에 인구가 집중했다가 분산하는 양상을 나타낸다.

서울시 생활인구는 연령별 상대적 차이를 보이며 본 연구는 서울 생활인구를 노년층(65세 이상), 유소년층(14세 이하), 노동 계층(15세 이상 65세 미만)으로 연령에 따라 구분한다.



[그림 1-5] 주의보 발령일 기준 서울시 행정동별 시간대별 생활인구 합계



[그림 1-6] 주의보 발령 일자 서울시 행정동별 시간대별 연령별 생활인구(%)

3) 연구자료

스마트서울 도시데이터 센서(S-DoT)는 ‘데이터 점들이 모여 스마트 서울이 된다’는 의미를 가지고, 2020년 4월부터 출범한 IoT 디바이스이다. S-DoT은 도시환경에서 일어나는 현상이나 시민들의 행동과 관련한 원천 데이터를 수집하고, 제공하며, 가공하여 유통을 목적으로 설치되었다. S-DoT의 최종 목표는 도시방재 및 과학적 행정을 통한 스마트 시티의 구현이다(서울 스마트 시티 프로젝트, 2019). 이러한 맥락에서 S-DoT은 서울시 전역에 설치되어 현재 1,100대로 미세먼지, 온도, 습도, 조도, 소음, 진동, 자외선, 풍향, 풍속 등의 다양한 환경정보를 제공한다. 추후 2022년까지 약 2,500개의 설치를 목표로 하고 있으며, 우리나라 최초의 도시 센서 설치를 통한 거리환경 도시데이터 수집 센서망으로서 활발하게 이용될 전망이다.

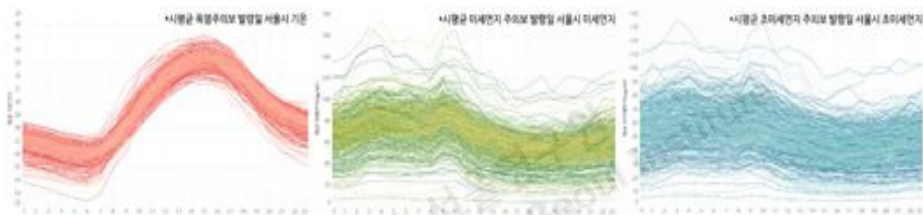
서울시 스마트도시 부서는 S-DoT을 통해 수집된 데이터를 서울 열린데이터광장에 공개하고 있다. 다만 센서의 위치정보는 별도의 신청서를 요하며 본 연구는 서울시 스마트도시 부서에 연락하여 2020년 6월 15일 자 기준 설치된 S-DoT의 시리얼 번호, 명, 자치구, 주소, 구분, 높이, 위도 및 경도 좌표체계를 입수했다. 수집된 S-DoT 좌표체계는 GIS상 공간 조인(Spatial Join)을 통해 행정동별 정보가 입혀졌다.

가공된 S-DoT 행정동별 위치정보는 파이썬(Python)을 통한 개발환경에서 S-DoT 시리얼 번호를 기준으로 원 도시 데이터 센서에 입혀졌으며 넘파이(Numpy), 판다스(Pandas)를 비롯한 기타 파이썬 라이브러리(Python Libraries)를 활용해 행정동별 시간별 평균 기온, 미세먼지, 초미세먼지를 계산한다.

데이터 누락을 최소화하기 위해 424개 행정동과 24시간의 행렬을 갖춘 별도의 데이터 프레임을 생성하여 가공된 데이터를 입혔으며 이때 확인되는 개별 행정동의 누락 치는 시간별 평균치로 보정한다. 이때 확인되는 누락 치는 가공된 10,176(424*24)의 데이터 중 5%를 넘지 않는 것으로 확인된다.

시계열 분석을 통해 본 결과 기온은 행정동별 비슷한 패턴을 공유하지만, 미세먼지는 행정동별 편차가 기온에 비해 큰 것으로 나타난다. 기온은 서울 생활인구와 마찬가지로 러시아워를 기준으로 올라갔다 점진적으로 내려가는 양상을 공유하는 것으로 보인다. 그러나 미세먼지는 새벽과 아침 시간대에 수치가 올라갔다가 오후에 이르러 완화되는 추세를 나타낸다.

서울 생활인구와 분석된 서울 시내 폭염, 미세먼지의 시공간적 차이에 따라 폭염과 대기 오염에 취약한 행정동은 시공간적 차이를 보일 것으로 기대한다.



[그림 1-1] 주의보 발령 일자 서울시 평균 온도, 미세먼지, 초미세먼지 시계열 분석

S-DoT 데이터 및 서울시 생활인구 데이터의 수집은 데이터의 누락으로 미세먼지 주의보 발령일 중 1일 치, 초미세먼지 주의보 발령일 중 3일 치는 본 연구의 시간적 범위에 포함하지 않는다. 연구의 시간적 범위로 설정한 2020년 4월 1일과 2021년 3월 31일 사이에 폭염주의보 17일, 미세먼지주의보 총 6일, 초미세먼지주의보 총 20일의 S-DoT 환경 센서 및 생활인구 데이터가 수집되었으며, 구체적인 수집 일자는 다음과 같다.

[표 1-1] 데이터 수집 일자

주의보	주의보/경보 발령 일자
폭염주의보 (총 17일) (기상청 기상자료개방포털**)	2020년 6월 9일, 10일, 21일, 22일, 23일; 2020년 8월 12일, 13일, 15일, 16일, 17일, 18일, 19일, 20일, 23일, 24일, 25일, 26일
미세먼지주의보 (총 6일) (에어코리아 권역별 미세먼지 주의보/경보 발령내역***)	2020년 4월 22일*; 5월 11일, 10월 22일; 2021년 1월 13일, 3월 29일, 3월 30일
초미세먼지주의보 (총 20일) (에어코리아 권역별 미세먼지 주의보/경보 발령내역***)	2020년 11월 15일, 16일*, 17일*; 12월 10일, 11일, 12일; 2021년 2월 1일*, 6일, 7일, 12일, 13일, 14일, 15일; 2021년 3월 10일, 11일, 12일, 14일, 26일, 27일, 29일

* 데이터 누락 일자

** 기상청 기상자료개방포털: <https://data.kma.go.kr/data/weatherReport/wsrlList.do?pgmNo=647>

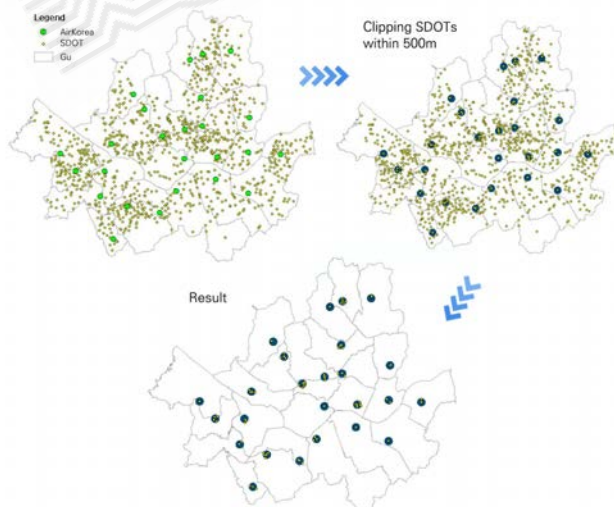
*** 에어코리아 권역별 미세먼지주의보/경보 발령내역:

https://www.airkorea.or.kr/web/pmWarning?pMENU_NO=115

02. 스마트서울 도시데이터 센서 비교분석

1_S-DoT 센서와 에어코리아 도시 대기 측정망의 비교

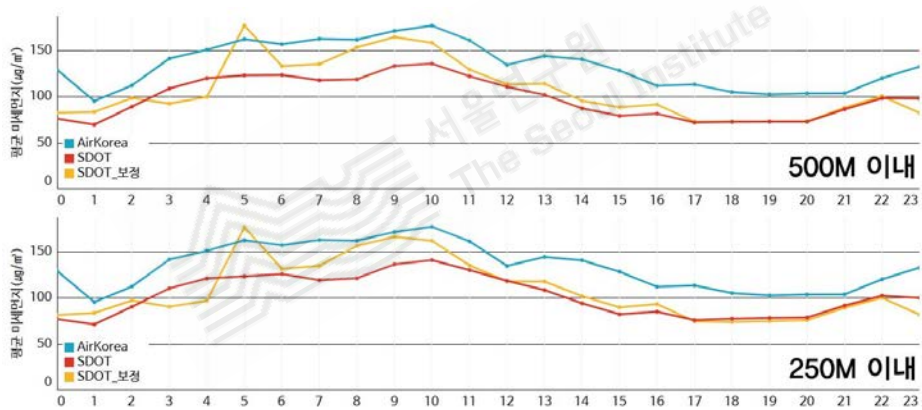
에어코리아 도시 대기 측정망과 인접한 S-DoT을 추출하기 위해 본 연구는 공간(GIS)분석과 버퍼(Buffer)를 활용하였다. 먼저, 2021년 6월 15일자 기준 운용 중인 S-DoT과 25개 에어코리아 도시 대기 측정망을 동일한 좌표체계 내 위치시킨 후 에어코리아 도시 대기 측정망을 기준으로 각각 반경 500m, 250m 원형의 버퍼를 생성한다. 생성된 버퍼에는 서울시 행정구 정보를 입히기 위해 행정구역과 공간 합성(Spatial Join)을 실시한다. 생성된 버퍼를 기준으로 해당 반경 내에 해당하는 S-DoT만을 각각 추출 후, 추출된 S-DoT의 시리얼번호를 기준으로 수집된 미세먼지와 초미세먼지 데이터를 필터링한다. 마지막으로 에어코리아 도시 대기 측정망 데이터와 함께 재가공하여 시간대별 시계열 분석을 실시한다.



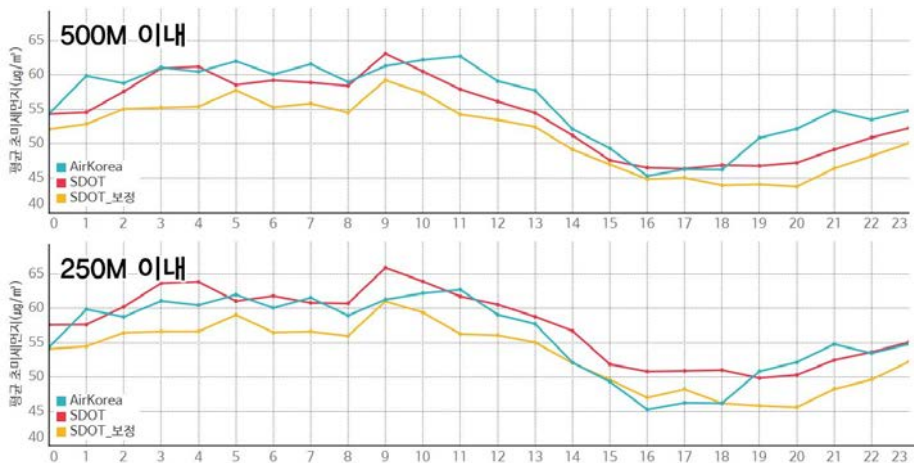
[그림 2-1] 버퍼(Buffer) 분석 예시: 에어코리아 반경 내 위치하는 S-DoT 추출

2_서울시 전역 대기오염 비교분석

분석 결과 아침 시간대 대기오염이 상대적으로 심화 되었다가 오후 시간에 완화되는 시계열 패턴이 공통적으로 나타났다. 서울시 전체 평균 시간대별 미세먼지와 초미세먼지 값을 비교하였을 때 에어코리아 도시 대기 측정망으로부터 500m나 250m 반경 내 위치한 S-DoT과의 유의미한 값의 차이는 두드러지지 않는다. S-DoT의 원값과 보정값 모두 유사한 시계열 패턴을 공유했으며 미세먼지 측정에 있어 에어코리아보다 평균치가 다소 낮게 측정된 것으로 조사되었다(그림 2-2). 그러나 초미세먼지 측정에 있어서 S-DoT과 에어코리아 도시 대기 측정망 사이 차이가 미세먼지 측정 대비 감소하는 것으로 나타났다(그림 2-3). S-DoT 원값과 보정값 사이 어느 한 쪽이 에어코리아 도시 대기 측정망 값과 더 유사하다고 단정할 수는 없으나 500m와 250m 반경 기준 모두에서 원값과의 차이가 더 작은 것으로 나타났다.



[그림 2-2] 서울시 평균 미세먼지 측정 비교 분석

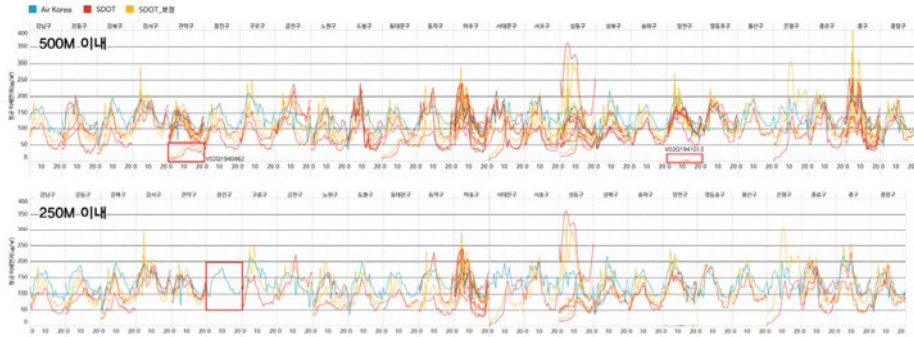


[그림 2-3] 서울시 평균 초미세먼지 측정 비교 분석

3_서울시 구별 대기오염 비교분석

서울시 구별 평균 시간대별 미세먼지와 값을 비교하였을 때 전반적으로 에어코리아 도시 대기 측정값, S-DoT 보정값, 원값 순으로 미세먼지 수치가 높은 것으로 조사되었으며 지역별 대기오염 수치의 편차가 존재함을 확인했다. 500m 반경 기준으로 수집된 S-DoT 값을 볼 때 센서별 편차가 심한 곳은 서울시 성동구와 중구로 조사되었으며 해당 구에 대한 상대적 대기오염 위험도 증가의 원인 도출 파악이 필요하다. 에어코리아 센서 값은 비교적 다른 구와 비교할 때 편차가 적은 것으로 나타나지만, S-DoT 측정값은 구별 두드러지는 편차와 스파이크가 나타나는 등 차이가 큰 것으로 나타난다.

250m 반경 기준에 위치하는 S-DoT 미세먼지 값을 보면 500m 반경 기준으로 수집된 S-DoT 미세먼지 값 대비 에어코리아 도시 대기 측정값이 더 유사했으며 이상치(Outlier) 제거에 용이했다. 그러나 금천구의 예시와 같이 해당 반경 내에 위치하는 S-DoT이 없거나 오작동 등의 원인으로 값이 -9999가 임하는 등의 문제가 있어 향후 상호 비교에 있어 누락치는 반경 250m를 넘어가는 S-DoT을 활용할 당위성이 존재한다.



[그림 2-4] 서울시 구별 미세먼지 측정 비교 분석

앞서 S-DoT과 에어코리아 도시대기 측정망 간의 서울시 전역 초미세먼지 시간대별 평균값의 차이가 미세먼지 대비 적었던 것과 달리 지역별 센서별 초미세먼지 서울시 구별 편차는 두드러지게 나타났다. 시계열 패턴은 공유하지만, 수치상의 편차가 두드러지며 500m 반경 기준 S-DoT 데이터를 통해 보았을 때 편차가 가장 심한 곳은 마포구, 성동구, 양천구, 중구로 조사됐다. 그리고 미세먼지 측정 대비 초미세먼지 측정에 있어 오작동하는 센서가 서대문구, 양천구, 은평구에 위치하는 것으로 나타났다.

마찬가지로 이상치 제거에 있어 250m 반경 기준에 위치하는 S-DoT 초미세먼지 값을 보면 500m 반경 기준으로 수집된 S-DoT 초미세먼지 값 대비 에어코리아 도시 대기 측정값과 더 유사했다. 그러나 금천구와 은평구의 예처럼 해당 반경 내 수집되지 않는 S-DoT 값이 있어 미세먼지 측정과 마찬가지로 향후 상호비교에 있어 누락치는 반경 250m를 넘어가는 S-DoT를 활용해야 한다.



[그림 2-5] 서울시 구별 초미세먼지 측정 비교 분석

4. 소결

S-DoT과 에어코리아 도시 대기 측정망 상호 비교분석 결과 지역별 미세먼지와 초미세먼지의 편차가 존재하는 것으로 나타났다. 센서별 편차는 미세먼지보다 초미세먼지에서 두드러졌다. 에어코리아 도시 대기 측정망 기준 동일한 반경 내에 위치하는 S-DoT이라 하더라도 수치상의 편차가 있지만 시계열 패턴은 공유하는 것으로 나타났다. S-DoT과 에어코리아 도시 대기 측정망으로 수집된 미세먼지와 초미세먼지가 시계열 패턴을 공유한다는 점에서 S-DoT의 대기오염 측정은 신뢰할 수 있겠으나 파악된 이상치와 오작동 문제를 해결할 필요성이 있다. 그리고 향후 두 센서 비교측정에 있어 에어코리아 도시 대기 측정망 기준 전체 반경 500m(반지름 250m)에 위치하는 S-DoT을 사용하는 것이 1km(반지름 500m) 기준을 사용하는 것보다 대기 오염요소 값이 유사할 것이나 S-DoT이 위치하지 않을 수 있어 후속 연구에 어려움이 있을 수 있다(예: 금천구, 은평구). 해당 누락치의 보정은 1) 기준 반경 밖의 위치하는 해당 구의 전체 S-DoT 값의 평균치를 사용하거나 2) 기준 반경 크기를 조절하여 반경 내 S-DoT을 추가 포함시켜 분석을 진행해야 한다. 또한, 각 측정 지점에 소규모 배출원이 존재하거나, 에어코리아 도시대기 측정망의 위치와 S-DoT 측정 지점과의 거리차로 인하여 편차가 발생했을 가능성도 배제할 수는 없으므로 이에 대한 추후 고찰이 필요하다. 그렇지만, 본 분석을 통해 미시적인 편차가 두드러지는 S-DoT 데이터를 활용한 Hyperlocal-scale의 도시환경 분석이 가능함이 입증되었다는 점은 의의가 있다.

03. S-DoT 데이터를 이용한 폭염 및 미세먼지 위험 분석

1_기술 통계 (Descriptive Statistics)

연구 기간 중 발령된 폭염주의보 발령일 기준 서울시 평균 기온은 29.29°C로 최저 기온 22.4°C, 최고 기온 35.23°C를 기록했다. 같은 기간 발령된 미세먼지와 초미세먼지 주의보 발령일 기준 서울시 평균 미세먼지 농도는 232.55($\mu\text{m}/\text{m}^3$), 최저 14.00($\mu\text{m}/\text{m}^3$), 최고 916($\mu\text{m}/\text{m}^3$)로 지역별 편차가 높았다. 평균 초미세먼지 농도는 51.45($\mu\text{m}/\text{m}^3$), 최저 3.47($\mu\text{m}/\text{m}^3$), 최고 135.67($\mu\text{m}/\text{m}^3$)을 기록했다.

서울시 생활인구의 경우 폭염주의보, 미세먼지주의보 및 초미세먼지주의보 발령일 기준의 행정동별 평균인구 비율은 위험요소별로 크게 차이가 없었으나, 노동인구의 평균이 전체 인구 대비 약 74%, 유소년인구가 약 10%, 노년 인구 비율이 약 16%를 차지함을 확인할 수 있었다.

폭염주의보, 미세먼지와 초미세먼지주의보 전체인구 대비 그룹화된 서울시 생활인구 기술 통계는 기후 위험요소와 함께 [표 3-1]에 요약하였다.

[표 3-1] 데이터 수집 일자 [표 1-1] 기준 기술 통계

변수			총사례 수	평균	표준 편차	최소값	중위값	최대값
S-DoT (2020- 2021)	기후위험 요소	평균 기온(°C)	10176	29.29	2.65	22.40	28.88	35.23
		평균 PM10 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	10176	232.55	108.15	14.00	218.00	916.00
		평균 PM2.5 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	10176	51.45	16.84	3.47	51.20	135.67
서울시 생활인구 (2020-	폭염주의보 발령일 기준	유소년 인구 (%)	10176	0.10	0.04	0.01	0.10	0.26
		노령 인구 (%)	10176	0.16	0.03	0.06	0.16	0.29
		노동 인구 (%)	10176	0.74	0.06	0.60	0.73	0.93

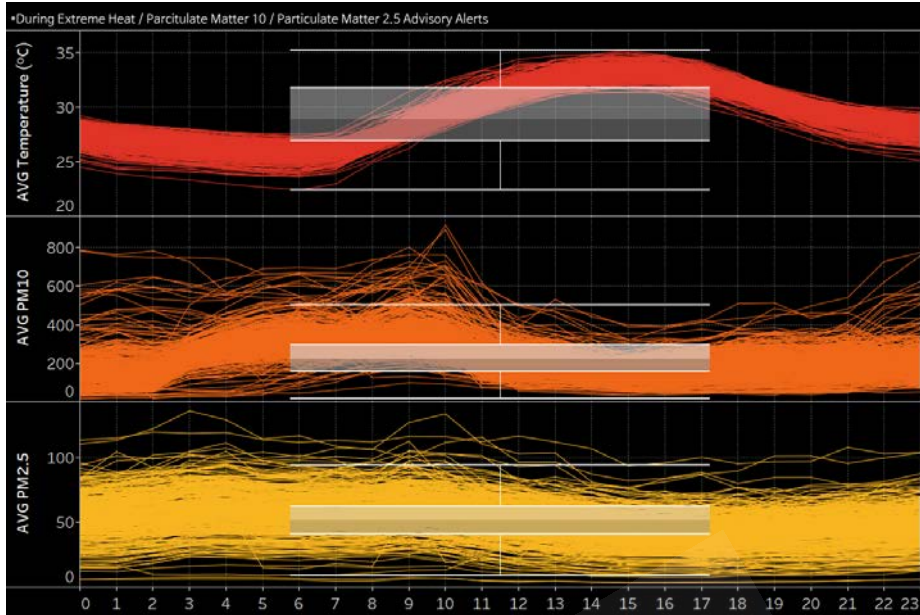
변수			총사례 수	평균	표준 편차	최소값	중위값	최대값
2021)	미세먼지 주의보 발령일 기준	유소년 인구 (%)	10176	0.10	0.04	0.00	0.10	0.29
		노령 인구 (%)	10176	0.16	0.04	0.05	0.16	0.30
		노동 인구 (%)	10176	0.73	0.06	0.58	0.73	0.94
	초미세먼지 주의보 발령일 기준	유소년 인구 (%)	10176	0.10	0.04	0.01	0.10	0.26
		노령 인구 (%)	10176	0.16	0.03	0.06	0.16	0.30
		노동 인구 (%)	10176	0.74	0.05	0.61	0.73	0.92

2_서울시 기후 위험요소, 생활인구 시간대별 평균 패턴 분석

1) 서울시 행정동별 시간대별 평균 기온, 미세먼지, 초미세먼지

연구 기간 동안 발령된 폭염주의보, 미세먼지주의보, 초미세먼지주의보 일자 기준 수집된 데이터를 바탕으로 서울시 평균 기온, 미세먼지, 초미세먼지 시간대별 평균을 분석한 결과 기온보다 미세먼지와 초미세먼지에서 서울시 행정동별 편차가 뚜렷하게 나타났다 [그림 3-1]. 서울시 행정동별로 볼 때 평균 기온의 경우 오전 7시 이후 상승하였다가 3시에 최고점을 기록한 후 점진적으로 완화되는 패턴을 공유하였으며 밤 시간대의 평균 기온이 새벽보다 다소 높게 기록됐다. 가장 기온이 높았을 때는 오후 3시로 35.2°C를 기록하였으며 가장 기온이 낮을 때는 오전 6시로 22.4°C를 기록하였다.

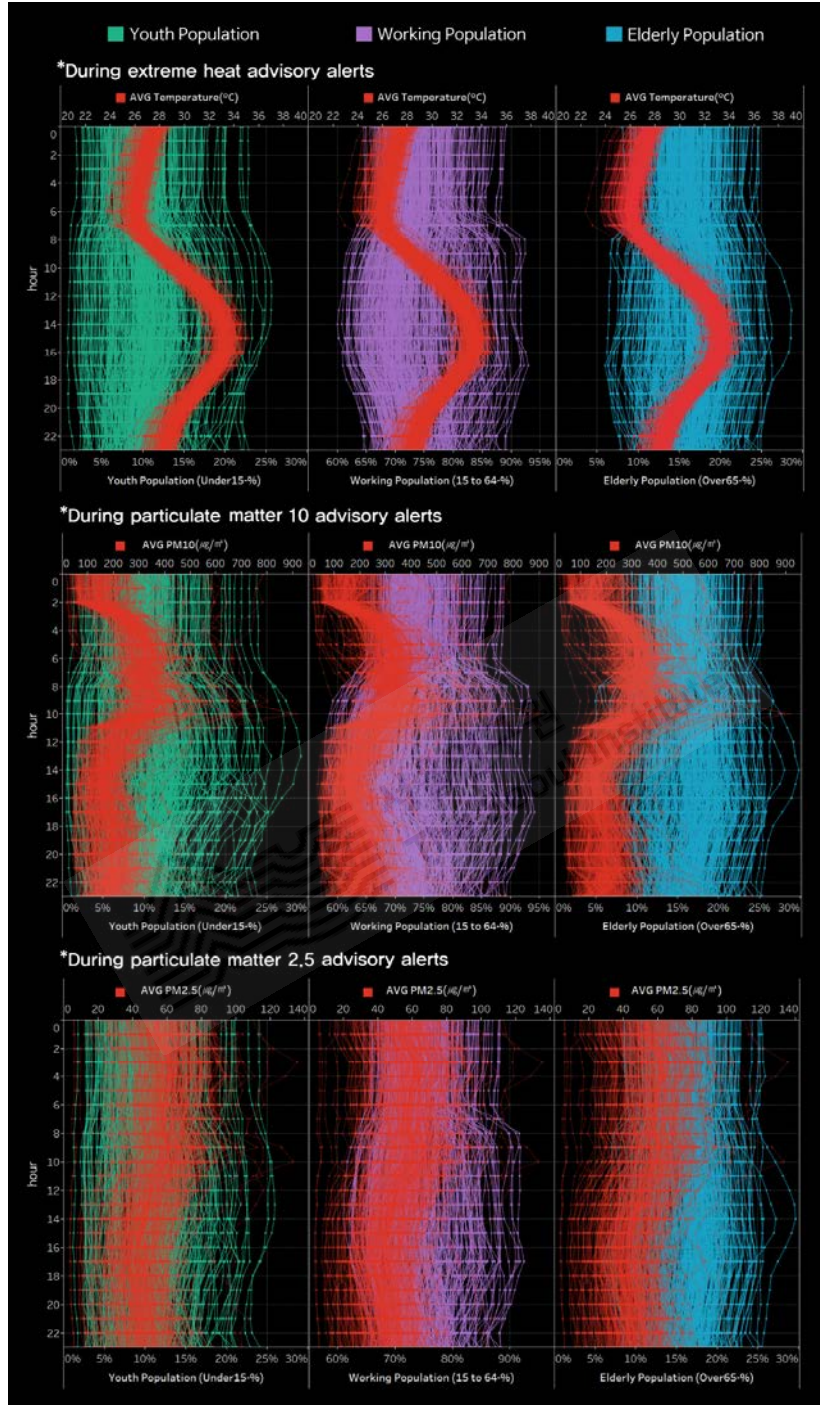
미세먼지와 초미세먼지의 경우 오전 시간대 집중되었다가 오후 시간대에 점진적으로 완화되는 양상을 공유하였지만 지역별 편차가 기온에 비해 뚜렷한 것으로 조사되었다. 행정동별로 볼 때 미세먼지가 가장 높은 시간은 오전 10시로 916 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 을 기록하였으며 가장 낮은 시간은 밤 12시로 14 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 를 기록하였다. 초미세먼지의 경우 미세먼지와 비슷하게 오전 10시에 가장 높은 것으로 조사되었고 오후 3시에 가장 낮은 것으로 나타났다. 각각 133 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 과 3.5 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 를 기록하였다.



[그림 3-1] 서울시 기온, 미세먼지, 초미세먼지 시간대별 평균 시계열 분석

2) 서울시 행정동별, 시간대별 평균 기온, 미세먼지, 초미세먼지와 생활인구

행정동별 수집된 기온, 미세먼지, 초미세먼지 데이터와 동일 시간대의 그룹화된 서울시 생활인구 데이터(유소년, 고령, 노동인구)와 결합한 결과 행정동별 그리고 나이별로 기후 위험도 편차가 시공간적(Spatiotemporally)으로 존재하는 것으로 파악되었다(그림 3-2). 오전 시간 이후로 기온이 올라갈 때 특정 연령대의 인구가 집중되는 행정동이 있는 반면, 오히려 인구 유출이 발생하는 경우가 있으며 기온, 미세먼지, 초미세먼지 위험도 분석 모두에서 나타났다. 다만 미세먼지와 초미세먼지 위험도의 경우 오전 시간대 상대적으로 대기오염이 심화되는 만큼 미세먼지와 초미세먼지가 상대적으로 심화되는 시간대에 인구가 집중하는 해당 지역이 그렇지 않은 지역보다 대기오염에 취약한 것으로 조사됐다.



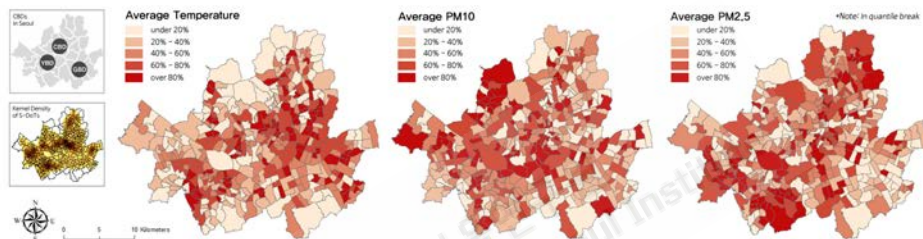
* 한 개의 선은 한 개의 동을 의미함

[그림 3-2] 서울시 온도, 미세먼지, 초미세먼지 생활인구별, 시간대별 평균 시계열 분석

3_서울시 기후 위험요소 공간 분석

1) 서울시 기온, 미세먼지, 초미세먼지의 공간 분포

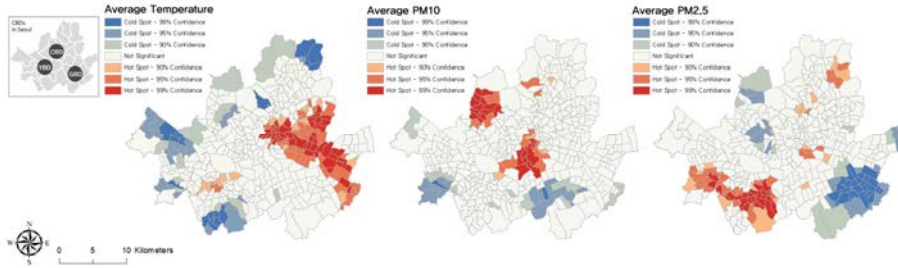
수집된 기온, 미세먼지, 초미세먼지 평균을 이용한 공간 분석 결과 평균 기온은 서울시 중부와 동부가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 미세먼지와 초미세먼지는 도심(CBD)에서 더 심한 것으로 조사되었으나 초미세먼지의 경우 서울시 남부와 북부 지역에 미세먼지 대비 더 집중되는 양상을 보였다. 설치된 S-DoT의 커널 밀도(Kernel Density)와 평균 기온, 미세먼지 초미세먼지 비교적 유사한 패턴을 공유했다[그림 3-3].



[그림 3-3] 서울시 평균 온도, 미세먼지, 초미세먼지 공간 분포

2) 피크아워 시간대 지역별 평균 핫스팟 분석

서울시 기온, 미세먼지, 초미세먼지 시간대별 평균 시계열 분석 결과 [그림 3-1]을 바탕으로 본 연구는 오전 12시부터 오후 6시까지를 기온의 피크아워 시간대, 오전 4시부터 10시까지를 미세먼지와 초미세먼지의 피크아워 시간대로 정의하였다. 각각의 피크아워는 6시간을 기준으로 한다. 통계적 유의성을 갖는 명확한 군집화 및 공간 분포를 확인하기 위해 본 연구는 핫스팟 분석(Hot Spot analysis: Getis-Ord Gi*)을 피크아워 시간대의 기온, 미세먼지, 초미세먼지에 실시하였다. 분석 결과 피크아워 시간대의 기온, 미세먼지, 초미세먼지의 핫스팟은 다른 군집화 및 분산 패턴을 보였다[그림 3-4]. 기온의 경우 서울시 동부, 미세먼지의 경우 서울시 도심과 북서부, 초미세먼지의 경우 서울시 서남부와 북부 지역에 핫스팟 군집이 계산됐다. 해당 핫스팟 군집은 피크아워 시간대 상대적으로 기온, 미세먼지, 초미세먼지의 위협에 더 노출되어 있는 것으로 판단한다.



[그림 3-4] 서울시 평균 온도, 미세먼지, 초미세먼지 피크아워 시간대의 핫스팟 분석 결과

4_소결

연구 기간 동안 폭염주의보, 미세먼지주의보, 초미세먼지주의보 발령 일자 기준 스마트 서울 도시 데이터 센서로 수집된 기온, 미세먼지, 초미세먼지를 행정동별로 분석한 결과 지역별 편차가 존재하는 것이 확인되었다. 동일 동시간대의 수집된 기후변수와 행정동별 유소년, 고령, 노동인구로 구분된 서울시 생활인구 데이터와의 결합 결과 행정동별 연령별 인구 이동과 기후변수별 위험도가 상이한 것으로 조사되었다. 폭염 기간 기온의 경우 오전 12시부터 오후 6시, 미세먼지와 초미세먼지의 경우 오전 4시와 오전 10시 사이 심화되는 것으로 나타났다. 해당 피크아워 시간대에 특정 연령대의 인구 이동이 행정동별 다른 결과를 바탕으로 볼 때 행정동별 연령별 기후위험도 또한 상이할 것으로 판단된다. 또한 공간 분석 결과 나타나는 기온, 미세먼지, 초미세먼지의 공간 분포 양상의 특징이 동일하지 않은 점은 기후위험 변수별 발생 양상과 특징이 다름을 의미한다. 시간대별 다른 행정동별, 연령별 인구 이동에 발맞추어 기온, 미세먼지, 초미세먼지의 상이한 발생 양상과 특징은 지역별 기후위험도의 편차가 시공간(spatiotemporally)적으로 다름을 의미하는 바이다.

04. 생활인구 데이터를 이용한 연령별 기후위험도 분석

1_Z-Score 산출 및 위험요소 맵핑 분석 방법

본 연구는 연령별 폭염, 미세먼지, 초미세먼지 위험과 노출도를 측정하기 위해 피크아워 시간대의 평균 기온, 미세먼지, 초미세먼지와 연령별 그룹화된 서울시 생활인구의 평균을 Z-score로 치환하였다. 서울시의 경우 행정동별 동 면적이나 인구밀도 그리고 도시 인프라 여건이 다른 점을 고려하면 개별 관찰값에 대한 정규화가 요구된다. Z-score는 개별 값을 해당하는 전체 값의 평균을 뺀 후 표준편차로 나누는 정규화 방법이다. Z-score는 개별 관찰값이 평균으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 나타내는 표준편차 숫자를 의미한다. Z-score 정규화는 개별 샘플이 평균값보다 높은지 또는 낮은지를 나타내는 데 유용하다(Lee et al., 2021). 양(+)의 Z-score는 해당 관찰값이 평균값보다 높은 것을 의미하며 음(-)의 Z-score는 평균값보다 낮음을 나타낸다. Z-score가 0인 관찰값은 정확히 평균에 위치한다. Z-score의 절대값이 클수록 이상치에 해당하며 평균으로부터 멀리 떨어져 있음을 나타낸다. Z-score 값의 -2에서 +2의 범위 내에 전체 관찰값의 95%가 위치한다. 본 연구는 기후 위험요소와 생활인구의 Z-score 계산 후 두 변수의 평균 Z-score를 다시 산출해 피크아워 시간대의 기후위험도를 측정하였다. 예를 들어 대기오염 위험도 관측에 있어 본 연구는 피크아워 시간대 산출된 미세먼지나 초미세먼지의 Z-score와 연령별로 그룹화된 서울시 생활인구의 Z-score를 평균화하여 사용하였다. 사용된 최종 Z-score의 산출 방식은 해당 방정식을 따른다:

$$\text{Z-score of Climate Risk} \rho = \text{AVG} (\text{Z-Score } \rho + \text{Z-Score } \sigma)$$

* ρ : Temperature, PM10, and PM2.5;

* σ : Human dynamics of advisory alert days for each ρ

평균된 Z-score는 20%의 가중치를 두어 5개 그룹으로 재분류하였고 위험도가 높은 상위 20%와 낮은 하위 20%의 동을 지도상에 개별 표시하였다. 연령대별 폭염, 미세먼지, 초미세먼지 위험도를 재차 공간 분석하였고 상위 20%와 하위 20% 상의 인구 사회학적, 도시환경, 도시 인프라 등의 유의한 차이를 분석하기 위해 독립 T-검정을 실시하였다. 사용된 T-검정은 해당 방정식을 따른다:

$$t = \frac{\bar{X}_H - \bar{X}_L}{SE_{\bar{X}_H - \bar{X}_L}}$$

where $\bar{X}_H$: Average of the Highest Climate Risk;

$\bar{X}_L$: Average of the Lowest Climate Risk;

$SE_{\bar{X}_H - \bar{X}_L}$: Standard Error of the Highest Vulnerable & the Lowest Vulnerable

분석의 단위는 서울시 행정동이며, 서울시에는 총 424개 행정동이 위치한다. 데이터 수집 일자는 다시 2020년 4월 1일부터 2021년 3월 31일까지이며 분석 과정에 있어 Python, ArcMap, Stata, Tableau Desktop과 같은 컴퓨터 소프트웨어 및 통계 프로그램이 사용되었다.

2_폭염, 미세먼지, 초미세먼지의 연령별 기후위험도 분석

기후위험도 분석에 있어 사용된 최종 평균화된 행정동별 Z-score 분석 결과 연령별 기후위험 종류별 노출도의 차이가 나타났다[그림 4-1]. 폭염의 경우 노동인구가 서울시 도심(CBD)에서 유소년인구와 고령인구에 비해 상대적으로 가장 노출된 것으로 조사됐다. 고령인구의 폭염 노출도는 노동인구나 유소년인구 대비 분산된 형태로 나타났으며 서울시 북부 지역에 집중되어 위치하였다. 미세먼지 노출도의 경우 노동인구와 고령인구가 비슷한 노출도에 있는 것으로 나타났는데 도심이나 북부 지역에서 가장 취약한 것으로 조사되었다. 유소년인구의 경우 상대적으로 분산된 미세먼지 노출도를 보였고 비교적 서울시 중심부에 집중된 형태로 나타났다. 초미세먼지 노출도의 경우 미세먼지 노출도와 비슷한 결과를 공유했다. 그러나 서울시 남부의 사례처럼 미세먼지에 위험도에 상대적으로 안정된 지역이 반대로 초미세먼지에는 가장 취약한 지역으로 분석되는 결과로 미루

어보아 서울 시민의 미세먼지와 초미세먼지 노출 위험도의 차이가 존재하는 것으로 조사되었다.

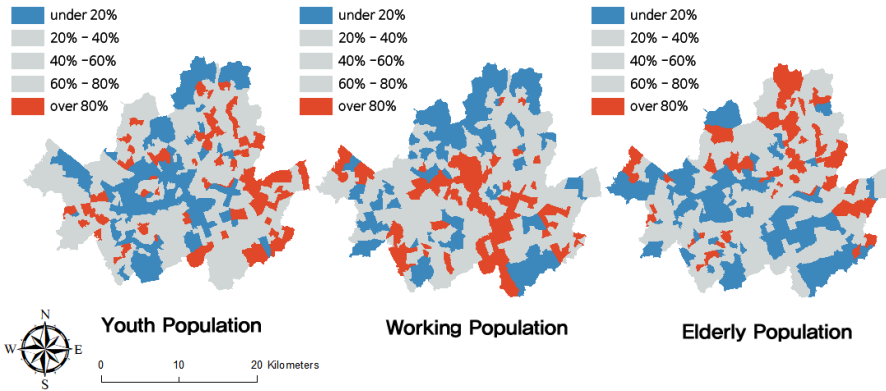
앞선 연령별, 행정동별 기후위험도 분석 결과를 바탕으로 본 연구는 모든 기후위험(폭염, 미세먼지, 초미세먼지)에서 항상 가장 취약한 행정동과 안정된 행정동을 연령별로 공간 분석하였다. 분석 결과 연령별 기후위험도는 지역적으로 유의한 차이를 보였다(그림 4-2). 유소년인구의 경우 폭염과 대기오염(미세먼지, 초미세먼지)의 노출도가 도심에서 가장 낮았고 서울시 행정동 전반에 걸쳐 분산된 형태로 나타났다. 반면 노동인구의 폭염 노출도는 도심에서 가장 두드러졌고 서울시 북부 지역에서 가장 안정된 것으로 조사됐다. 고령인구는 폭염과 대기오염 전반에 걸쳐 서울시 남부에서 가장 덜 노출된 것으로 조사되었으나 서울시 북부 지역에서 높은 노출도를 보였다.

서울시 연령별 공통된 기후위험분석 결과(그림 4-2) 연령대별 기후위험도의 지리적 차이가 두드러지는 만큼 위험도가 파악된 높은 행정동과 낮은 행정동 사이의 유의한 차이를 분석하기 위해 본 연구는 독립 T-검정을 시행하였다. T-검정 실시에 있어 인구사회학적, 공원 녹지 관련, 도시 인프라 변수들을 행정동별 서울시 공공데이터 포털로부터 수집하였다. 몇몇 변수들은 서울시 구별로 제공되어 공간 분석틀을 사용하여 면적 가중치를 계산한 후 개별 행정동으로 값을 분산하였다. T-검정 결과는 다음 챕터에서 후술하였다.

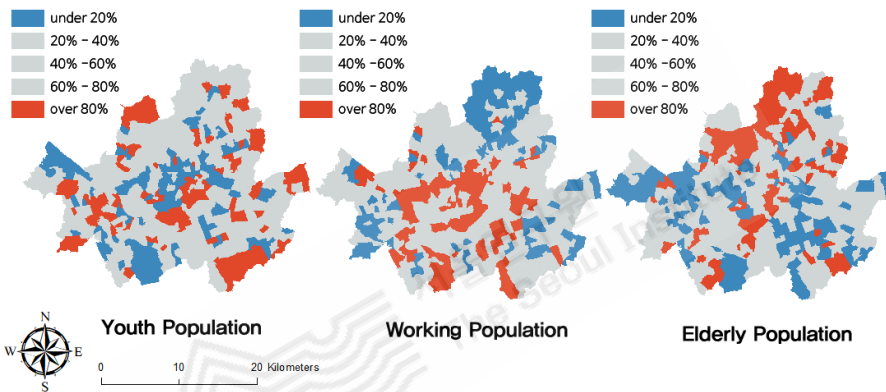


Extreme Heat

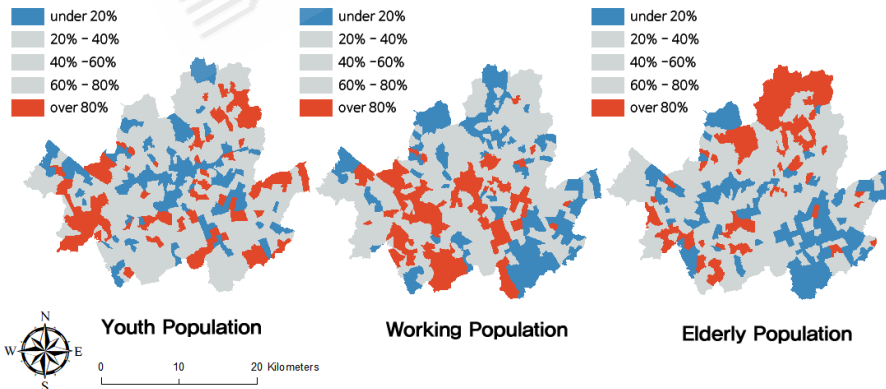
*Note: In quantile break



Particulate Matter 10



Particulate Matter 2.5

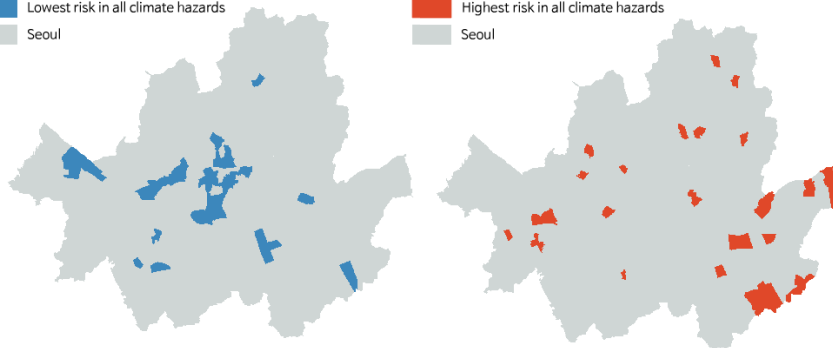


[그림 4-1] 서울시 연령별 기후위험도 분석 결과

Youth Population

■ Lowest risk in all climate hazards
■ Seoul

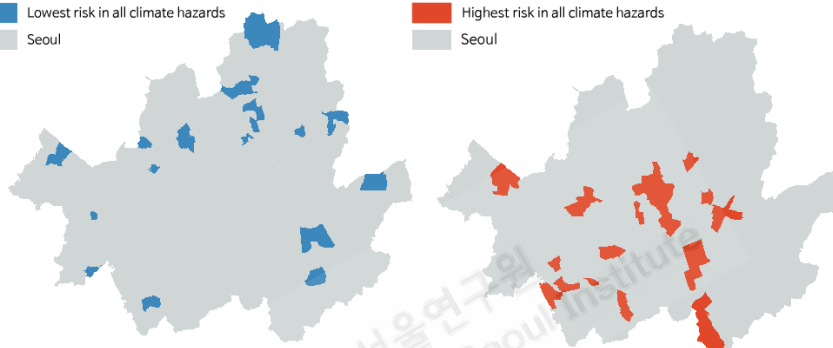
■ Highest risk in all climate hazards
■ Seoul



Working Population

■ Lowest risk in all climate hazards
■ Seoul

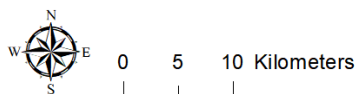
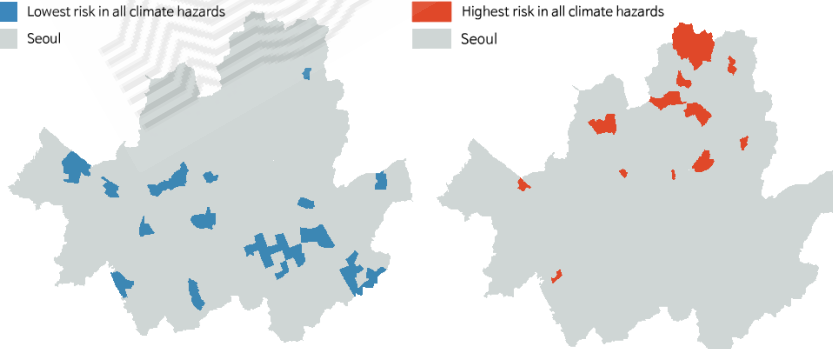
■ Highest risk in all climate hazards
■ Seoul



Elderly Population

■ Lowest risk in all climate hazards
■ Seoul

■ Highest risk in all climate hazards
■ Seoul



* 폭염, 미세먼지, 초미세먼지 모두 가장 취약하거나 상대적으로 안정된 지역

[그림 4-2] 서울시 연령별 공통단* 기후위험도 분석 결과

3_인구·사회학적, 도시환경 관련 변수의 기술 통계

연령별 기후 위험요소별 기후위험요인의 높은 지역과 낮은 지역의 통계적으로 유의미한 차이를 분석하기 위해 본 연구는 독립 T-검정을 실시하였다. T-검정 실시를 위해 서울시 행정동별 인구사회학적, 공원 녹지와 도시 인프라 관련 변수를 수집하였다. 인구사회학적 변수는 2020년 주민등록인구, 수집하여 분석에 사용된 서울시 생활인구, 그리고 서울시 취약 인구를 포함한다. 취약 인구는 독거노인, 소년가장, 장애인, 기초수급, 기저질환 인구와 일용직 노동자, 1인가구 수를 포함한다. 공원 녹지 관련 변수는 공원 개소, 1인당 공원, 도시공원, 도시 생활권 공원의 면적을 고려했다. 도시 인프라 관련 변수는 서울시에서 진행 중인 폭염 및 미세먼지 대안 정책의 일환으로 시행 중인 무더위쉼터와 스마트쉼터 설치 사업을 고려하여 행정동별 무더위쉼터와 스마트쉼터 개소를 포함시켰다.

기초통계량을 보았을 때 연령별 주민등록인구와 서울시 생활인구는 비슷한 분포 양상을 공유한다[표 4-1]. 취약 인구의 경우 서울시 행정동별 평균 863명의 독거노인, 928명의 장애인, 847명의 기초수급을 받는 저소득층 인구, 23,424명의 기저질환 인구, 1,979명의 일용직 노동자, 530의 1인가구 수가 조사되었다. 그러나 기저질환 인구와 일용직 노동자 수처럼 편차가 평균보다 큰 경우가 있어 지역별 편차가 있음을 감안해야 한다. 공원 녹지의 경우 서울시 행정동별 평균 1인당 1.09(m²)의 공원 0.71(m²)의 도시공원, 0.35(m²)의 도시 생활권 공원 면적이 보고된다. 하지만 최저 1인당 0.08(m²)의 공원 면적을 가진 행정동부터 1인당 26.76(m²)의 공원 면적을 가진 행정동이 보고되는 등 지역별 편차가 뚜렷하다. 도시 인프라 관련 변수와 관련하여 무더위쉼터 개소는 행정동별 평균 39개가 지정 또는 설치된 것으로 파악되며 최저 4개소부터 최고 158개소가 지정 또는 설치되었다. 스마트쉼터의 경우 최근에 진행된 사업인 탓에 총 설치 개소 수가 적어 지역별 설치 개소 수의 편차가 미미했다.

[표 4-1] T-검정 수집 변수

변수			동수	평균	편차	최소값	중위값	최대값
인구 사회학적 변수	주민등록 인구 (2020)	고령인구 (%)	424	0.16	0.03	0.07	0.16	0.37
		노동인구 (%)	424	0.74	0.04	0.60	0.74	0.89
		유소년 인구 (%)	424	0.10	0.03	0.02	0.09	0.24
	서울시 생활인구 (2020)	평균 고령인구 (%)	424	0.16	0.03	0.08	0.16	0.26
		평균 노동인구 (%)	424	0.74	0.05	0.64	0.73	0.89
		평균 유소년인구(%)	424	0.10	0.04	0.01	0.10	0.24
	취약인구 (2012~ 2020)	독거노인 수 (2020)	424	863	401	1	798	2448
		소년가장 수 (2012)	424	0	1	0	0	4
		등록된 장애인 인구 (2020)	424	928	496	3	828	3827
		기초수급을 받는 저소득층 인구(2020)	424	847	667	5	698	5485
		기저질환 인구(2020)	424	23424	23125	1380	16730	196519
		일용직 노동자 수 (2019)	424	1979	5759	22	977	108747
		1인 가구 수(2020)	424	530	295	2	529	999
공원 녹지 관련 변수 (2020)	공원 개소		424	7	7	1	5	54
	1인당 공원 면적(m ²)		424	1.09	2.08	0.08	0.59	26.75
	1인당 도시공원 면적(m ²)		424	0.71	1.16	0.02	0.40	14.73
	1인당 도시 생활권 공원 면적(m ²)		424	0.35	0.50	0.04	0.22	7.09
도시 인프라 관련 변수 (2020)	무더위쉼터 개소		424	39	23	4	33	158
	스마트쉼터 개소		424	0	1	0	0	2

4_연령대별 기후위험 노출도와 인구학적·도시환경 변수와의 연관성

독립 T-검정 실시 결과 연령대별 기후위험도가 가장 높은 지역과 낮은 지역 사이 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다[표4-2]. 우선 주민등록인구와 서울시 생활인구 차이가 연령대별 두드러졌는데 해당 결과는 서울시 생활인구가 행정동별 등록된 주민등록인구를 바탕으로 보정된 데이터임을 재차 확인시킨다. 연령대별 기후위험도가 높은 지역은 해당 연령대의 주민등록인구가 기후위험도가 낮은 지역보다 많은 것으로 나타났다. 구체적으로 독립 T-검정 실시 결과 유소년인구의 기후위험도가 높은 지역은 기후위험도가 낮은 지역 대비 유소년인구의 주민등록 인구가 많은 것으로 통계적으로 유의하게 나타

났다($p < 0.001$). 노동 인구의 기후위험도가 높은 지역은 기후위험도가 낮은 지역 대비 노동인구의 주민등록 인구가 많은 것으로 유의했다($p < 0.001$). 고령 인구의 기후위험도가 높은 지역은 기후위험도가 낮은 지역 대비 고령인구의 주민등록 인구가 많은 것으로 유의했다($p < 0.001$).

취약 인구의 경우 소년가장, 기저질환자, 1인가구 수의 등록에 있어 모든 연령대에서 기후위험도가 가장 높은 지역과 낮은 지역 사이 유의한 차이가 나타나지 않았다. 그러나 독거노인, 장애인, 기초수급생활자, 일용직 수는 가장 높은 지역과 낮은 지역 사이 유의한 차이가 노동인구와 고령인구 기후위험도에서 유의한 차이를 보였다. 고령인구의 기후위험도가 가장 높은 지역은 안정된 지역 대비 독거노인, 장애인, 기초수급생활자 수가 많았다. 노동인구의 기후위험도가 가장 높은 지역은 안정된 지역 대비 독거노인, 장애인, 기초수급생활자 수가 적었지만 일용직 노동자의 수가 유의하게 많은 것으로 조사됐다. 해당 분석 결과는 통상 인식되는 독거노인, 장애인, 기초수급생활자가 취약 인구로서 기후위험도에 가장 노출되어 있음을 나타내며 연령대별 특징이 다름을 의미한다.

공원 녹지 관련 변수들과 관련하여 노동인구의 기후위험도가 가장 높은 지역은 안정된 지역 대비 유의하게 1인당 더 넓은 도시 공원($p < 0.05$)과 서울시 생활권 면적($p < 0.01$)을 갖고 있었다. 그러나 유소년 인구의 기후위험도가 가장 높은 지역은 안정된 지역 대비 1인당 공원, 도시 공원, 생활권 면적이 낮은 것으로 나타났다. 해당 결과는 노동인구가 유소년인구 대비 상대적으로 공원 녹지 접근성이 높은 점을 시사한다.

도시인프라 관련 변수들과 관련하여 유소년인구와 노동인구에서 유의한 차이가 있었다. 유소년인구의 기후위험도가 가장 높은 지역은 안정된 지역 대비 무더위쉼터의 개소의 수가 유의하게 적은 것으로 조사됐다($p < 0.05$). 반면 노동인구의 경우 기후위험도가 가장 높은 지역이 안정된 지역 대비 설치된 무더위쉼터의 개소가 유의하게 많은 것으로 나타났다($p < 0.05$). 공원 녹지 관련 변수에 있어 유소년 인구와 노동인구의 차이처럼 노동인구가 폭염 발생을 피할 수 있는 기회가 상대적으로 많은 것으로 나타났다. 최근에 설치되기 시작한 버스정류장과 시민쉼터를 결합하여 무료 WiFi, 공기청정기, 충전 시설을 갖춘 스마트쉼터의 경우 2020년에 이르러 165개만 설치되었던 탓에 현재까지는 행정동별 기후위험도가 높은 지역과 낮은 지역 사이 유의한 차이가 두드러지지 않았다.

[표 4-2] T-검정 수집 결과

변수			유소년		노동		고령	
			t	p	t	p	t	p
인구 사회학적 변수	주민등록 인구	고령인구 (%)	-2.558	0.014*	-2.321	0.024*	11.609	0.000***
		노동인구 (%)	-5.382	0.000***	9.395	0.000***	-5.099	0.000***
		유소년인구 (%)	11.439	0.000***	-5.471	0.000***	-2.466	0.019*
	서울시 생활인구	평균 고령인구 (%)	1.181	0.244	-7.748	0.000***	17.779	0.000***
		평균 노동인구 (%)	-12.613	0.000***	23.218	0.000***	-6.474	0.000***
		평균 유소년인구(%)	16.663	0.000***	-9.847	0.000***	-0.529	0.600
	취약 인구	독거노인(2020)	-1.350	0.184	-2.282	0.028**	6.177	0.000***
		소년기장 수(2012)	0.872	0.390	-1.641	0.113	1.829	0.083
		등록된 장애인 인구 (2020)	1.171	0.247	-4.397	0.000***	5.388	0.000***
		기초수급을 받는 저소득층 인구(2020)	-0.934	0.355	-2.480	0.019**	5.367	0.000***
		기저질환 인구(2020)	0.791	0.434	-0.792	0.434	-0.258	0.799
		일용직 노동자 수 (2019)	-1.613	0.119	2.168	0.038*	-4.314	0.000***
		1인가구 수(2020)	1.260	0.214	-0.974	0.335	-0.330	0.744
공원 녹지 관련 변수	공원 개소		-0.496	0.622	0.222	0.825	-0.836	0.411
	1인당 공원 면적(㎡)		-2.428	0.021*	-0.110	0.913	1.797	0.090
	1인당 도시공원 면적 (㎡)		-2.540	0.016*	2.573	0.014*	-0.850	0.400
	1인당 도시 생활권 공원 면적(㎡)		-2.864	0.007**	2.772	0.008**	-0.606	0.549
도시 인프라 관련 변수	무더위쉼터 개소		-2.712	0.011*	2.504	0.016*	-0.166	0.869
	스마트헬터 개소		-1.177	0.272	0.925	0.360	0.351	0.727

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

5_소결

연령별 기후위험도 분석 결과 기후위험(폭염, 미세먼지, 초미세먼지) 종류별 노출도의 차이가 유의하게 나타났다. 노동인구는 도심에서 폭염의 노출도가 심했지만 고령인구와 유소년인구는 도심에서 상대적으로 안정된 노출도를 보였다. 대기오염(미세먼지, 초미세먼지)의 경우 고령인구는 서울시 북부에서 가장 높은 노출도를 보였고 노동인구는 다시 도시에 그리고 유소년인구는 분산된 형태로 노출 위험도를 보였다. 독립 T-검정 실시 결과 인구사회학적, 공원 녹지 관련, 도시 인프라 변수들의 연령별 기후위험이 가장 높

은 지역과 안정된 지역 사이 유의한 차이가 나타났다. 요컨대 고령인구 기후위험도가 높은 지역에 독거노인, 장애인, 기초수급생활자가 안정된 지역 대비 유의한 차이를 보이는 것은 해당 취약계층의 위험도 저감을 위한 맞춤형 정책의 필요성을 시사한다. 실제로 서울시 북부 지역은 쪽방촌을 비롯해 독거노인이 밀집해 거주하는 곳으로 알려져 있으므로 해당 기후 위험지역의 폭염 및 미세먼지 대응 방안을 검토할 필요성이 있다. 반면 유소년인구의 기후 위험지역은 노동인구 대비 도시 공원 접근성과 무더위쉼터의 개소가 부족한 것으로 조사되었는데 이들의 기후위험 노출도를 낮추기 위해 도시 공원과 무더위쉼터의 절대 개소량을 증설할 필요가 있겠다. 그러나 유소년인구는 학교와 카페 같은 공공시설을 자주 이용하는 점과 절대적인 양의 증가가 이용량 증가로 이어진다고 단정하기 어려운 만큼 유소년인구의 특징을 반영한 기후위험 완충 정책이 입안되어야 한다.



05. 정책 제언

1_현 기후변화 관련 계획 검토 및 연계성

1) 현 기후변화 관련 계획과의 연계성

서울시의 폭염 및 미세먼지에 대응하기 위한 기후변화 정책을 제안하기에 앞서, 본 연구는 국가적인 차원에서 현재 진행되고 있는 기후변화 관련 계획들을 우선적으로 검토하고, 국가 단위의 기후변화 계획에 보다 밀접하게 연관되어 추진될 수 있는 새로운 대안들에 대해 제안하고자 한다. 2019년 정부는 논문과 기사를 중심으로 한 문헌조사 및 전문가 포럼, 기후 영향 인과 지도 등 과학적 근거를 기반으로 하는 부문별 국가 기후변화 리스크 목록을 구축하였고, 이에물관리, 생태계, 국토·연안을 포함하여 6대 부문에서 93개 리스크를 발표하였다(관계부처합동, 2020). 이 중 폭염과 미세먼지와 관련한 도시 환경 및 보건, 산업과 에너지 분야의 관련 부문별 리스크가 다양하게 제시되었다. 우선 국토·연안 부문의 리스크는 도로 인프라와 철도 등 교통시설과 관련하여 기온의 변동으로 인해 조기 파손되거나, 시설물의 변형 등의 문제를 초래하는 것 등이 제시되었고, 통신 및 전기 시설의 피해도 하나의 위험요소로 제시되고 있다. 또한, 폭염으로 인해 주거지역에서의 열 스트레스가 증가하는 것도 기후적 측면에서의 리스크로 작용하고 있음을 확인할 수 있었다. 건강 분야와 관련하여, 폭염과 대기오염으로 인해 증가할 수 있는 여러 가지 관련 질환들, 이를테면 심뇌혈관계 질환, 호흡기계, 알레르기 질환, 정신건강, 심장질환 및 온열질환 등의 증가 또한 기후변화로 인한 건강 부문의 리스크로 볼 수 있다. 더불어 산업적 측면에서는, 기후변화로 인한 소비패턴, 관광 매출 등의 감소가 산업 전반에 미치는 영향이 우려되고 있으며, 에너지 부문에서는 기온 변동성의 증가로 인한 냉난방 소비의 증가와 전력 수급 시스템에서의 문제들이 제시되고 있었다. 폭염 및 미세먼지와 관련한 국가 기후변화 리스크 목록은 다음과 같다.

[표 5-1] 폭염 및 미세먼지 관련 국가 기후변화 리스트 목록

부문	리스크 번호	리스크명
국토·연안 부문	L07	기온 변동성 증가로 인한 포장도로 조기파손 현상 증가
	L08	폭염으로 인한 철도레일 변형 및 탈선 위험 증가
	L10	이상 기상 현상(폭우, 강풍, 폭설, 폭염)으로 인한 전기/통신시설 피해 증가
	L13	폭염으로 인한 주거지역 열 스트레스 증가
건강 부문	H04	대기오염에 의한 심뇌혈관계 질환 증가
	H05	기온 상승에 의한 심뇌혈관계 질환 증가
	H06	기온 변동폭 증가로 인한 심뇌혈관계 질환 증가
	H08	대기오염에 의한 호흡기계·알레르기 질환 증가
	H09	대기오염에 의한 정신건강 질환 증가
	H10	기온 상승에 의한 호흡기계·알레르기 질환 증가
	H11	폭염에 의한 정신건강 질환 증가
	H12	폭염에 의한 신장질환 증가
산업·에너지 부문	H13	폭염에 의한 온열질환 증가
	I01	폭염, 한파, 폭우로 인한 제조업 생산성 감소
	I05	기온 상승, 폭염, 폭우, 가뭄으로 인한 관광객 및 매출 감소
	I06	기후 변화로 인한 소비자의 소비패턴 변화
	I10	기온 상승, 폭염, 폭우, 강풍으로 인한 송전/변전 효율 저하 및 시설 손상
	I11	폭염 및 한파로 인한 냉난방 에너지 사용 증가
	I12	폭염 및 한파로 인한 전력 수요 증가와 정전 위험

이를 기반으로 2020년 제3차 국가 기후변화 적응대책(2021~2025)이 마련되었다. 정부는 「저탄소 녹색성장 기본법」 제 48조 제4항 및 동법 시행령 제38조 제1항을 법적 근거로 하여 5년마다 국가 단위의 기후변화 적응대책을 연동계획으로 수립·시행하도록 하였다. 이 계획의 주요 내용은 국가적인 차원에서 기후변화 적응을 위하여 장기적으로 추진해야 하는 방향 수립을 중심으로 하고 있으며, 그 세부 내용으로는 국제협약 등에 관한 사항, 기후변화에 대한 감시·예측·제공·활용 능력 향상에 관한 사항, 부문별·지역별 기후변화의 영향과 취약성 평가, 적응대책, 취약계층·지역 등의 재해 예방, 녹색 생활운동과 기후변화 대책의 연계 추진에 관한 방향 설정 등이 있다. 제3차 국가 기후변화 적응대책은 상위계획인 ‘제3차 녹색성장 5개년 계획(‘19~‘23)’과 ‘제2차 기후변화대응 기본계획(‘20~‘40)’과 연계하여 계획 간의 상충되는 목표들이 없도록 검토되어왔으며, 하위계획으로 각 광역·기초지자체의 기후변화 적응대책 세부 시행계획의 근거가 되고 있다(관계부처합동, 2020).

2) 서울특별시 기후변화 대응 종합계획 검토 (2022~2026)

서울시는 앞서 언급한 2020년 제3차 국가 기후변화 적응대책(2021~2025)을 기반으로 '2050 서울시 기후행동 계획'을 통해 대응 정책을 발표하였다. 크게 온실가스 감축 정책과 기후변화 적응 정책을 토대로 건물, 수송, 폐기물, 에너지, 숲, 건강, 재난·재해, 물관리, 산림·생태계 부문의 주요 정책과 추진 일정을 수립하였으며, 이를 성공적으로 추진했을 경우 2005년 대비 2030년까지 54.6%, 2040년까지 89.9%의 온실가스 배출량을 감축하는 시나리오를 제시하였다.

또한, 최근 서울특별시 기후변화대응 종합계획(2022~2026) 수립연구를 통하여 각 부문별·세부사업별 온실가스 감축 세부 시행계획을 세우고, 이를 위한 구체적인 성과 목표 등을 제시하여 앞서 언급한 2050 기후행동 계획이 실질적으로 실행될 수 있는 과제 목표를 구체화한 바 있다. 앞서 추진되었던 2017~2020년도 추진실적과 성과를 평가하여 미흡한 지점이 추가되었고, 이를 서울시 조례, 법령, 계획 등에 근거하여 추진될 수 있도록 새로운 사업 내용들을 다루고 있다. 더불어, 기후환경 분야에서 다양한 거버넌스 구조가 어떻게 운영되고, 모니터링되며, 과제 수행이 있어서의 주관 부서 및 협조 부서, 상제과제 추진 계획 등이 국가 단위의 계획과도 긴밀하게 연결되어 있는지, 상충되는 목표들은 없는지를 구체적으로 논의하여 기후변화 대응에 대한 종합계획으로서의 중·단기 계획들을 확인해볼 수 있다는 점에서 의의가 있다.

국가 단위 및 서울시의 기후변화 대응 계획들을 살펴본 결과, 이미 법적인 토대와 계획으로서의 근거는 체계적으로 마련되어 있는 상황이며, 해를 거듭할수록 구체적인 정책들 또한 부문별로 추가되어왔음을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 서울시민들의 삶에 실질적인 영향을 줄 수 있는 정책의 개발도 중요하지만, 그에 못지않게 좋은 계획들의 체계적인 실행과 목표의 성취 또한 중시되어야 할 것으로 예상된다. 그러나 본 연구와 관련하여, 아직 서울시 IoT 환경 센서인 S-DoT와 기후변화 정책과의 연계성이나 추후 활용방안, 추가 설치 및 데이터를 기반으로 한 취약계층의 파악 등과 관련한 정책은 미흡한 수준임을 확인하였다.

따라서, 본 연구는 폭염과 미세먼지를 중심으로 하는 기후변화 취약계층을 위한 맞춤형 정책 및 IoT 센서의 활용방안에 대하여 제안하고, 취약계층을 중심으로 하는 지원사업이 효과적으로 실행될 수 있는 방안에 대하여 중점적으로 논의해 보고자 한다.

2_폭염과 미세먼지 저감을 위한 기후 정책 제언

1) 맞춤형 기후변화 취약계층 지원사업의 확대

(1) 기후변화 취약계층 파악을 위한 법적, 정책적 근거 마련

본 연구에서는 행정동별 유소년, 고령, 노동인구로 구분된 서울시 생활인구 데이터와 의 결합을 통해 기온과 미세먼지, 초미세먼지를 분석한 결과 행정동별 연령별 인구 이동과 기후변수별 위험도가 상이한 것을 확인할 수 있었다. 이는 지역별 기후위험도의 편차가 시·공간적으로 다름을 의미하며, 이에 따라 해당 기후위험에 노출되는 취약계층에 대한 장기적이고 지속적인 관심이 필요하다는 것을 의미한다. 이에 본 연구는, IoT 센서와 기존의 데이터를 적극적으로 기후변화 정책에 활용할 수 있는 취약계층 파악을 위한 법적, 정책적인 근거를 마련할 것을 제안한다. 현재의 기후변화 관련 법적 근거는 대부분 「저탄소 녹색성장 기본법」을 근간으로 하며, 지자체 단위의 기후변화 적응대책 수립과 시행을 의무화하고 있다. 추후 센서 데이터를 기반으로 하는 데이터 이용이 보다 적극적으로 요구될 것으로 예측되며, 이에 대응하기 위해서는 보안 측면에서 안전하고, 모니터링 및 공유의 투명성 등을 보장할 수 있는 법적, 정책적 토대가 미리 마련되어야 할 것이다.

앞서 4.4장의 분석 결과에서 확인한 바와 같이, 기후변화의 취약계층은 연령대별 그룹뿐 아니라 장애인, 임산부, 독거노인, 기초수급 생활자, 옥외노동자 등 다양한 사회·경제적인 요인들과 결합하여 기후위험도가 증가할 수 있음을 알 수 있었다. 현재 「재난안전법」상 안전 취약계층은 노인, 아동, 환자로 제한적으로 규정하고 있다. 그러나, 본 연구에서 확인한 바와 같이, 고령화와 소득 양극화 등으로 인한 폭염·한파·미세먼지·감염병 등의 영향을 받는 사회·경제적 취약계층은 추후 점차적으로 증가할 것으로 예상된다. 통계청 자료에 따르면, 65세 이상 고령인구의 비율이 '20년 15.7%(808만 명)에서 '35년 30.0%(1,560만 명)로 약 2.5배 증가하여 사회 전반의 기후변화 취약성이 앞으로 꾸준히 증가할 것으로 예측하고 있다(통계청, 2019). 이는 빠른 고령화로 인하여 기후변화 취약계층의 인구 비율 또한 지속적으로 증가할 것임을 시사한다. 따라서 기후변화의 취약계층을 보다 세밀하고 면밀하게 파악할 수 있는 근거 및 장·단기적으로 기후변화로 인한 건강 영향 영역을 정기적으로 모니터링할 수 있는 적절한 평가 방법 및 지표가 신속히 개발되어야 할 것이다. 특히 폭염이나 미세먼지가 악영향을 미칠 수 있는 기저질환 환자

나 건강 취약계층에 대한 건강 평가가 우선적으로 실시되어야 한다.

마지막으로 본 연구는 지역적으로 기후 취약계층의 밀집지역을 파악하였다. 기후변화와 관련이 있는 질병이나 질환 등을 가진 인구의 성별, 연령별, 지역적인 분포와 그 특성을 파악하는 것은 향후 또 다시 폭염이나 미세먼지에 노출될 위험에 놓였을 경우 보다 빠른 대응과 대비가 가능하도록 할 것으로 예상된다. 따라서 지역적으로 취약계층의 건강 및 생활 등에 미치는 영향이 생활적 측면에서 면밀히 파악되어야 하고, 도시·환경적인 측면에서 이를 개선하기 위한 기본적인 근거를 파악하기 위하여 이러한 건강 실태 조사가 장기적이고 체계적인 형태로 지속되어야 할 것이다.

(2) 기후변화 취약계층 대상 건강 서비스의 제공

앞서 인구 노령화와 소득 양극화로 인한 기후변화 취약계층의 증가가 예상될 것임을 언급하였다. 이에 대비하기 위해서는 폭염 및 대기오염 등의 기상재해에 따른 질병이나 질환의 건강관리 프로그램의 개발이 시행되어야 한다. 본 연구에서 살펴본 노인층, 노동계층, 유소년 층은 기후변화에 대한 위험 증상 및 변화, 위험요소가 신체적 조건이나 노출도에 따라 각각 다르게 나타나며, 더 나아가 사회·취약계층별 (장애인, 임산부, 옥외노동자, 외국인노동자 등) 재해를 경험하게 되는 어려움 등이 다를 수 있음을 반영하여, 보다 면밀한 건강 관리의 모니터링이 필요할 것으로 보인다. 보건적 측면에서 지속적인 모니터링이 이루어지기 위해서는, 우선적으로 지자체에서의 프로그램 실행을 위한 인력의 확충이 보장되어야 할 것이다. 또한 실질적으로 독거노인, 저소득층의 일상적이고 개인적 건강관리가 어려운 상황을 고려하여 실질적으로 생활에서의 위급한 상황에서 온열환자나 호흡기 질환 환자들이 이용할 수 있는 구급시설의 구비와 관리가 보다 강화될 필요가 있다. 특히, 독거노인이나 노숙인 등의 사회적 소외계층이 우선적으로 기후 질환 기반 건강평가를 지속적으로 지원받을 수 있는 시스템의 구축이 필요하다.

한편, 안전보건공단 자료에 의하면, 기후변화로 인하여 폭염이나 한파에 따른 극한 기상의 빈도 및 강도가 심해짐에 따라 건설근로자, 농촌근로자, 배달근로자 등을 포함하는 야외근로자의 기후위험이 크게 증가한 것으로 파악되었다(안전보건공단, 2019). 보고서에 따르면, 온열질환 산업재해 사망자는 2015년 1명에서 2016년 6명으로 증가하였고, 2017년 5명으로 소폭 감소하였으나, 2018년에는 다시 12명으로 크게 증가하였다. 비슷한 맥락에서, 안현찬 외 (2021)는 폭염기 취약계층의 인터뷰와 서울시민 패널조사를 통하여 폭염의 영향으로 인한 생활양식과 건강 수준이 전반적으로 악화되었고, 이는 사

화·경제적인 영향과 맞물려 다양한 기후 취약계층의 형태로 드러나며, 이에 대응하기 위하여 특성별 생활문제에 맞춤형 지원이 필요할 것을 제안하고 있다. 같은 맥락에서, 본 연구 또한 기후변화로 인한 취약계층을 대상으로 하는 건강서비스의 우선적 지원을 제안하는 바이다.

[해외사례] 폭염에 대응한 거리노숙인 보호대책

미국 뉴욕의 CODE RED 정책

미국 뉴욕의 노숙인 서비스 부서(DHS)는 폭염에 대비하여 ‘코드 레드’라는 정책을 운영하고 있다. 코드 레드 레벨 1은 하루 이상 최고 기온이 화씨 100도(섭씨 37.7도) 이상에 이르거나 이를 연속 여는 시점에서도 화씨 95도(섭씨 35도) 이상에 이를 것으로 예보되는 밤 12~8시 사이에 발효된다. 코드 레드 레벨 2는 최고 기온이 화씨 105도(섭씨 40.6도) 이상에 달하거나 4일 이상 화씨 95도(섭씨 35도)에 도달할 것으로 예측될 때 발효되며, 폭염이 지속되는 기간 동안에는 지속적으로 유효하다.

코드 레드가 발표되면 드랍-인 센터에서는 가능한 한 많은 노숙인을 받을 것을 권고하고 있으며, 갈 곳이 필요한 사람은 누구나 문제시될 수 있는 밤에 일반적인 자격 절차를 거치지 않고 DHS 대피소에 들어가 대피할 수 있게 하였다. 또한 과거에 DHS 대피소에 거주한 적이 있는 성인 노숙인의 경우, 할당된 대피소뿐만 아니라 어떤 대피소도 빠르게 접근할 수 있는 곳이라면 어디든 이용할 수 있다. 폭염에 대비한 냉방이 가능한 벤이나 시설이 이에 해당되며, 코드 레드가 시행되는 동안에는 더 많은 봉사 팀들이 서비스와 쉼터를 제공하고, 시원한 곳이 필요한 사람은 누구나 병원 응급실로 걸어 들어갈 수 있다(공중보건의 위험이 되는 상황 제외). 이는 폭염을 재난의 차원에서 접근한 예이며, 이로 인해 직접적인 생존 및 건강상의 위협에 직면할 수 있는 거리 노숙인에 대한 폭염 대처 매뉴얼을 제공하고 있다는 점에서 눈여겨볼 만한 정책사례라 할 수 있다.

2) 기후변화 리스크 지역의 실태 파악 및 환경 개선

(1) 저소득층 주택지역에서의 온실가스 저감 및 에너지 정책 확대

본 연구의 분석 결과에서, 연령별 기후위험 종류별 노출도의 차이가 나타남을 알 수 있었다. 특히, 폭염의 경우 노동계층은 여의도, 종로, 강남 일대의 서울시 도심(CBD)에서 유소년인구와 고령인구에 비해 상대적으로 가장 노출된 것으로 조사됐다. 고령인구의 폭염 노출도는 노동인구나 유소년인구 대비 분산된 형태로 산발적인 분포를 나타냈으나, 특히 서울시 북부지역(도봉구 일대)에 집중되어 나타났다. 유소년층의 경우는 광진구, 송파구, 강남구 일대의 취약도가 높은 것으로 드러났다. 노년층과 어린이 계층의 폭염 취약도가 주거지역이 많은 서울시 북부와 남부지역에 분포함을 감안할 때, 이 지역에 거주하는 거주 취약계층을 위한 기후변화 대책이 필요함을 시사한다. 특히 기후변화로 인한 냉방 및 에너지 수요의 증가로 인하여 전기세의 부담이 상대적으로 커진다는 측면에서, 저소득 취약계층의 에너지 효율화 대책이 우선적으로 마련되어야 할 것이다. 이를테면,

LED 조명의 확대나, 집수리 지원사업으로 인한 에너지 효율 개선을 시범적으로 시행함으로써, 점차적으로 주택지역을 중심으로 하는 온실가스 저감 및 에너지 효율 개선 사업들을 확대 운영할 것을 제안한다.

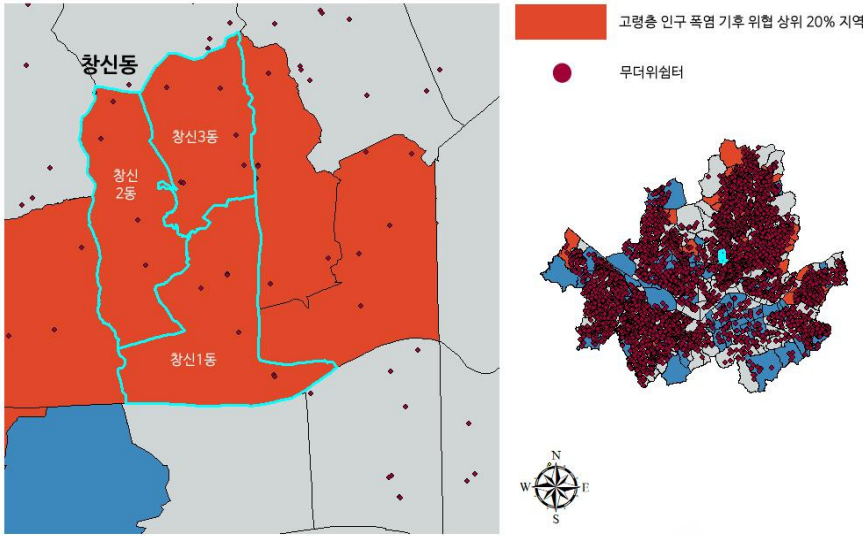
(2) 기후 취약지역의 생활 밀착형 대안의 필요성

① 무더위쉼터의 운영 활성화 방안

현재 서울시에서 운영 중인 무더위쉼터는 약 3,400여 개소로 복지관·경로당·주민센터 등 다양한 형태로 운영되고 있으며, 올해 쪽방 주민 전용 무더위쉼터 14곳도 추가로 지정되어 운영되었다(연합뉴스, 2022). 올해는 시범적으로 독거노인 1만 2천 500여 가구를 대상으로 IoT 센서 기기를 설치하여 실시간으로 노인분들의 움직임을 확인하고 실내 온도를 체크함으로써 방 안 온도가 35도 이상이면 폭염 대피 안내를 시범적으로 운영하였다(연합뉴스, 2022). 기후 취약계층에 대한 지원방안에 점차적으로 확대되어가고 있는 긍정적인 방향에도 불구하고, 여전히 무더위쉼터의 운영과 이용률이나, 무더위쉼터까지 이동하기 위한 옥외 가로환경에 대한 평가는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 무더위쉼터의 추가적인 설치에 집중하기보다, 실질적으로 현재 운영 중인 무더위쉼터를 이용하는 시민들(노인, 쪽방촌 거주민, 장애인, 거리노숙인 포함)들이 무더위쉼터를 이용하기 위해 경험하게 되는 보행환경과 보행 거리 등이 적합한지 오픈스트리트맵을 통하여 파악해보았다.

〈무더위쉼터 설치현황과 가로 경관〉

우리나라 대표적인 쪽방촌이 위치한 돈의동, 창신동, 동자동, 영등포동 등의 무더위쉼터 운영의 접근성과 보행환경은 어떠한가? 본 연구는 무더위쉼터가 설치된 지역의 고령인구의 접근성을 검토하기 위해 1) 고령 인구의 폭염 기후위험도가 높은 행정동을 선정하고, 2) 오픈스트리트맵(Open Street Map)을 통해 해당동에 설치된 무더위쉼터의 설치현황을 검토한 후, 3) 네이버 거리뷰를 이용하여 가로 경관 특징을 분석하였다. 고령인구의 폭염 기후위험도가 높은 행정동으로 우리나라 4대 대표 쪽방촌인 창신동을 선정하였으며, 창신1동, 창신2동, 창신3동 모두가 고령인구의 폭염 기후위험도가 높은 행정동에 해당한다(그림 5-1). 창신1동, 창신2동, 창신3동 행정별로 평균 4개의 무더위쉼터가 운영 중인 것으로 파악된다.



[그림 5-1] 서울시 창신동과 고령인구의 폭염 기후위험 노출도

오픈스트리트맵을 이용한 위성 분석 결과 창신동 내 대다수의 무더위쉼터가 주민시설, 복지재단, 아파트 단지 내 노인정과 같은 공공시설로서 운영되는 형태이거나 간선도로나 집산도로 인근에 위치하는 것으로 파악되었다[그림 5-2]. 창신1동의 경우 무더위쉼터가 동쪽에 위치하고 있는데 주간선도로가 서와 동쪽의 지역의 경계를 구분 짓는다. 창신2동의 경우 비교적 경사가 가파른 북향의 도로를 따라 무더위쉼터가 입지하는 특징이 있다. 창신3동에 위치한 무더위쉼터는 인근에 아파트단지가 위치하는 점이 특징이다.



[그림 5-2] 서울시 창신동과 무더위쉼터 운영 현황

가로뷰를 통한 가로 경관 분석 결과 창신1동은 창신동에서 가장 넓은 폭의 주간선도로가 위치하며 동쪽을 향해서는 저용적률의 건축물이 수평으로 길게 이어진다(그림 5-3). 해당 주간선도로는 창신1동 서쪽에 거주하는 고령인구가 창신1동 동쪽에 위치한 주민센터이자 무더위쉼터를 이용하기에는 걸림돌로 작용할 것으로 추측된다. 또한 보행자로서 폭염 시 횡단보도를 지나며 차량에서 배출되는 열기와 가로수의 그늘이 없이 이동하게 된다는 점을 감안하면, 무더위쉼터까지의 이용에 어려움이 있을 것으로 예상되었다. 창신

동의 경우 보행자와 차량이 혼잡하여 이용하는 10m 미만의 보행자우선도로가 주로 설치되어 있는데 [그림 5-4]의 보행 중인 보행자의 사례처럼 보행 시 갓길을 이용해야 하는 불편함이 있다. 그리고 아파트 단지 내 지정된 창신3동의 사례의 경우 [그림 5-5] 인근에 거주하는 아파트 주민들의 편의는 보장되겠으나 빌라나 다른 단지 거주자가 실질적으로 해당 무더위쉼터를 방문해 이용하고 있을지는 확인하기 어렵다.



[그림 5-3] 창신1동과 가로 경관



[그림 5-4] 창신2동과 가로 경관



[그림 5-5] 창신3동과 가로 경관

결론적으로, 창신1동, 창신2동, 창신3동에서 운영되고 있는 무더위쉼터를 검토해본 결과, 쪽방촌 거주민들이 이용하기 위한 접근성 및 보행환경의 측면에서 개선이 필요할 것으로 사료된다. 현재 운영되고 있는 무더위쉼터를 더욱 효과적으로 운영하기 위해서는 보행로 가로수 심기, 신호등 그늘막의 운영, 건물의 차양 설치, 보행로 설치로 차량과의 분리 등 보다 실질적으로 시민들의 이용함에 있어서 개선될 수 있는 방안들이 적극적으로 반영될 필요가 있다. 또한 노약자나 어린이 등 무더위쉼터의 다양한 취약계층의 이용을 장려하기 위하여 시민들을 대상을 하는 설문조사 등이 추후 추가적으로 연구되었으면 한다.

② 도로 물뿌리기 사업의 지원

도로 물뿌리기는 폭염으로 인해 상승하는 불쾌지수를 낮추고 달궈진 도로의 표면온도를 저감시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 섭씨 33도 이상의 폭염에서 물뿌리기 사업을 시행할 경우, 승강장 0.8도, 도로면 6.5도, 인도 1.5도까지 온도 저감효과를 기대할 수 있으며, 이러한 효과는 여름철 도심 열섬 현상을 개선하는 데에 도움을 줄 것으로 기대된다. 특히 물뿌리기 사업은 도로의 비산 먼지를 제거하는 데에도 도움을 줄 수 있다는 점에서 도로 중심의 미세먼지 및 폭염의 영향이 중첩되어 나타나는 지역에서 큰 효과를 기대해볼 수 있다. 도심지역뿐 아니라, 독거노인과 저소득층이 많이 거주하고 있는 주거지역에서 시행할 경우 실내 냉방시설이 열악한 주거환경에 거주하는 시민들의 온도 저감효과에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

③ 취약계층 폭염대비 방문건강 관리

서울시는 독거노인이나 만성질환자, 장애인 등 취약계층에 대해 폭염 대비 방문건강관리를 시행하고 있다. 방문간호사를 동반한 건강 생활지원 서비스의 일환으로 해당 가정을 정기적으로 방문하여 기초적인 건강검진 및 건강 상담, 폭염 대비 행동 요령 및 대피 교육, 온열질환 증상에 따른 대처요령 교육, 물병이나 파스 등 폭염 대비 건강 생활 물품 배부 등을 통하여 실질적으로 취약계층을 보호할 수 있는 서비스를 확대할 것을 제안한다. 또한 앞서 본 연구에서 밝힌 폭염 취약계층의 주거지역이 밀집되어 있는 동들을 중심으로 비상 연락망을 구축하고, 폭염주의보나 폭염경보, 겨울철 한파주의보 등 극한 기상 상황에서의 비상 문자 발송 및 안부 전화 등을 통해 취약계층의 집중 모니터링이 시행될 수 있도록 상시 대응체계를 미리 구축해놓을 필요가 있다. 그리고 독거노인이나 독거 장애인의 경우 실내 IoT 센서 등의 설치를 통하여 생활 움직임이 없거나, 실내 기온이 생활하기 어려울 수준으로 상승할 경우, 비상상황에서의 대응이 보다 원활하게 이루어질 수 있도록 대응 시스템을 갖추는 방안 또한 고려해볼 수 있을 것이다.

또한 독거노인 등의 취약집단의 경우 사회적 네트워크가 없을 시, 기후위험요인이 발생하였을 때 방문건강 관리인을 제외하고, 주변의 지원을 받기가 어려운 상황이 처할 수 있다. 이는 신체적인 건강과 더불어 정신건강에도 상대적으로 중요한 영향을 미칠 수 있음을 인지해야 할 것이다. 따라서 방문건강 서비스를 제공할 때 기후변화가 가져올 수 있는 정신건강의 측면 또한 취약집단의 특성에 따른 적절한 접근이 이루어져야 할 것이다.

④ 노동자들의 폭염 보호 대책 강화

정부 차원에서 내놓고 있는 온열질환 예방수칙은 사실상 노동 현장에서 활용되지 못하는 경우가 많다(경향신문, 2022). 고용노동부, 농림축산식품부, 질병관리청 등 대부분의 부처에서는 폭염주의보·폭염 경보가 발효된 경우에 물을 마시거나, 그늘에서 쉬거나, 휴식을 취하는 등으로 더위를 피하라고 권고하고 있다. 옥외작업을 할 경우에는 1시간마다 10~15분가량 그늘에서 휴식을 취하고, 시원한 물을 자주 마시라는 것이 주요 내용이다. 그러나 폭염주의보와 폭염 경보는 일 최고 체감온도가 33도, 35도 이상으로 이틀 이상 유지될 때 발효된다는 점에서, 특정 지역의 체감온도가 이 기준에 도달하지 못하더라도 실질적으로 노동 중인 근로 환경이 그 기준을 훨씬 상회할 가능성이 있다는 데에서 현실적 적용의 어려움이 발생한다. 질병관리청의 집계에 따르면, 2021년 5월 20일부터 9월 말까지 전국의 약 500개 응급실에서 사망자 7명을 포함한 1,427명의 온열질환자가 발생하였고, 이 중 65세 이상이 389명(27.3%), 50대가 310명(21.7%)로 노령인구에서의 온열질환 발병 비율이 높게 나타났다. 특히, 직업별로는 단순 노무 종사자가 346명(24.2%)로 가장 많은 반면, 전문직·사무직 종사자는 각각 37명(2.8%)으로 비중이 적었다(경향신문, 2022). 이는 연령이 높을수록, 야외에서 일할수록 폭염 시 온열질환에 더 취약할 수 있음을 시사하는 수치다.

특히 건설현장에서의 온열질환 예방수칙은 현실적 적용이 매우 어려운 실정이다. 산업안전보건법은 공사대금 20억 원 이상의 건설현장에서는 휴게실과 화장실 설치를 의무화하고 있지만, 그 세부적인 사항에 대해서는 사업자의 자율에 맡기고 있기 때문에, 건설현장에서의 편의시설 부족은 법적인 제재를 가하기가 힘들다. 옥외 건설현장이 아니더라도, 물류센터 사업장에서의 작업환경은 공기 순환이 되지 않고, 습도 조절이 되지 않아 냉방시설 확충이 시급한 실정이다.

산업현장에서의 온열질환 환자들이 지속적으로 증가하는 가운데, 폭염에 노출되는 장소에서 일하는 노동자의 범위를 확대하고, 구체적인 기준과 규칙들이 법적 근거를 가질 수 있도록 강화되어야 한다. 또한 여름철 열악한 환경에서 일하는 이주노동자들의 증가를 고려하여, 폭염 예방 대책에서 소외되지 않도록 대책이 강구되어야 할 것이다. 정부는 폭염으로 인한 온열질환이 발생할 수 있는 옥외 건설현장, 옥외 설치현장, 비닐하우스, 물류센터, 외국인 노동자 기숙사 등의 다양한 환경을 검토하여, IoT 센서의 실내·외 활용에 대해 적극적으로 검토해볼 필요가 있다. 정기적으로 기온을 체크하고, 이에 예방 차원에서의 모니터링으로 고온에 노출되기 이전에 냉방·휴식·수분 공급 등 빠른 조치가 취해질 수 있도록 작업환경의 개선이 필요하다.

[해외사례] 폭염에 대응한 옥외노동자 보호규정 마련

미국 워싱턴주의 정책

2021년 여름, 미국 워싱턴주의 노동부는 캘리포니아주 다음으로 고용주들이 폭염과 관련된 질병 및 부상으로 부터 옥외 노동자들을 보호하기 위해 취해야 할 조치들을 요약한 긴급 옥외 열 노출 법안을 추진하였다. 발효된 워싱턴 규정에 의하면 고용주들은 옥외 열 노출 안전 프로그램을 서면으로 작성할 것을 의무화하였고, 실외 온도에 따라 달라지는 노동자들의 트레이닝, 그늘막 제공, 적절한 식수 및 유급 쿨다운 휴식 기간 등을 제공하도록 요구하고 있다.

최근 증가하고 있는 폭염으로 인하여, 극한의 기온이 직장에서 큰 위험요소가 될 수 있다는 것을 인지하였고, 앞으로 기후변화를 고려하여 취하는 조치임을 성명을 통하여 밝히고 있다. 워싱턴주 외에도 메릴랜드와 버지니아를 포함한 미국의 여러 주에서 노동에서의 열 스트레스와 관련한 기준을 마련하고 있으며, 지난 3월에는 이를 확대하여 미국 하원과 상원 민주당은 농장 노동자들을 보호하기 위해 연방 열 스트레스 법안을 도입했다. 주 정부의 더위 스트레스 기준은 다양하지만, 이 모든 기준에 따른 고용주들의 공통적인 어려움 중 하나는 날씨와 관련된 의료 비상사태를 겪고 있는 사람이 있을 경우를 대비한 관리자와 직원을 훈련시키는 것이다. 이번 법안을 추진하면서, 고용주는 이러한 문제에 대해 직원들과 소통하고, 응급 의료 대응 치료가 필요한 요인을 식별하여, 어느 시점에 온열질환에 대비한 조치가 필요한지를 판단할 수 있도록 충분히 준비가 되어야 하며, 이에 대한 적절한 지원이 필요하다는 내용을 공유하고 있다.

⑤ 대기오염 취약지역을 고려한 아토피·천식 안심학교 선정

정부는 영·유아 및 초등학교를 대상으로 아토피 및 천식 질환을 앓고 있는 아이들이 안심할 수 있는 환경을 조성하기 위하여 아토피·천식 안심 보육시설 및 초등학교를 지정하여 운영하고자 하는 방침을 내놓았다. 2010년 질병관리본부 알레르기 질환 유병률 조사에 따르면, 아토피 피부염 유병률은 초등학교 1학년(6~7세) 어린이의 20.6%, 중학교 1학년(12~13세) 청소년의 12.9%에 달하는 것으로 보고되었으며, 2000년 역학조사 결과에서는 같은 연령대의 유병률(6~7세 13.4%, 12~13세 6.7%)에 비해 각각 2.2배와 3.2배가 증가한 것으로 나타났다. 이에 정부는 2009년 83개소의 시범학교를 운영하기 시작하여, [표 5-2]에서 보는 바와 같이 점차적으로 안심학교 개소 수를 확대해왔다(서울시, 2022).

[표 5-2] 연도별 아토피 천식 안심학교 현황

(단위 : 개소)

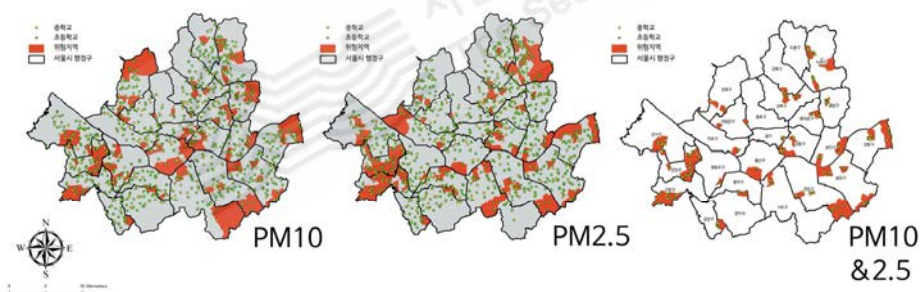
구분	2017	2018	2019	2020	2021
학교 수(개소)	691	654	655	606	671

안심학교의 주요 사업내용을 살펴보면, 아토피 피부염 전문 의료진이 무료 선별검사를 실시하도록 하고, 부모 및 학생 교육, 건강캠프 프로그램을 연계하며, 천식 응급키트를

비치할 수 있도록 지원하고, 보건교사 등을 대상으로 아토피 질환 이론교육과 실습교육을 실시하여 응급상황에 대처할 수 있도록 하였으며, 환경 위해도를 파악하고 종합 환경 컨설팅을 시범운영하는 등 다양한 사업들로 발전시켜왔다.

앞서 본 연구의 4장 2절에서는 서울시의 미세먼지와 초미세먼지의 노출위험이 높은 지역들을 분석하였다. 이와 관련하여, 이번 챕터에서는 대기오염 노출도가 높은 서울 시내 초등학교와 중학교를 파악하기 위하여 유소년인구의 미세먼지 그리고 초미세먼지 기후 위험도를 초·중학교와 중첩하여 공간 분석을 실시해 보았다.

분석 결과 서울 시내 초등학교와 중학교는 도시 전반에 걸쳐 균등하게 걸쳐있지만, 강서, 양천, 구로구에서 가장 많은 수의 학교들이 미세먼지와 초미세먼지 모두의 위협에 노출된 것으로 나타났다 [그림 5-6]. 초등학교 610곳 중 88곳(14%)이 미세먼지와 초미세먼지에 모두 노출되어 있고 141곳(23%)과 152곳(25%)이 각각 미세먼지와 초미세먼지에 노출되어 있다. 중학교 390곳 중 56곳(14%)이 미세먼지와 초미세먼지 모두의 위협에 노출되어 있으며 89곳(23%)과 97곳(25%)이 각각 미세먼지와 초미세먼지에 노출되어 있다. 상대적으로 대기오염 노출에 안정된 서울시 행정구는 도봉, 종로, 서대문, 마포, 용산, 영등포구이다.



[그림 5-6] 대기오염과 서울시 내 초등학교와 중학교 운영 현황

이러한 분석 결과는 데이터를 기반으로 하여 대기오염 노출의 위험도가 높은 지역을 선별하여, 안심학교를 우선적으로 지정하는 데에 적절한 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 추후 아토피·천식 환아의 통학 경로나 통학 시간대를 파악하여 데이터를 기반으로 한 예측 연구가 진행된다면, 기후변화에 대비한 어린이 활동공간의 집중 관리를 보다 체계적으로 계획할 수 있을 것으로 예상된다. 이에 더불어 IoT 환경 센서를 활용하여 어린이들을 위한 극한기상 대비 건강영향 관리 플랫폼이나 폭염/한파 대비 알람 앱을 개발하

거나, 영유아의 대기오염 노출이 심한 지역을 중점적으로 S-DoT 데이터의 모니터링을 통해 시간대별 경보제를 운영, IoT 미세먼지·초미세먼지 모니터링에 기반한 도로먼지 흡입 및 긴급 물청소 등 환경안전과 관련한 다양한 활용방안을 개발해볼 수 있을 것이다.

(3) 교통시설을 통한 기후변화 위험지역의 도시환경 개선 방안

교통시설은 온실가스 배출의 주된 원인이기도 하며, 폭염과 대기오염 등 기후변화의 직접적인 노출을 야기시키는 요소로써 기후변화에 대비한 적절한 개선이 필요하다. 최근 들어 나뉘카 운영에 대한 관심이 증가하면서 환경 분야에서는 공유 시스템으로 인한 온실가스의 저감이 기대되고 있다. 그러나 현실적으로 나뉘카나 공유자전거를 포함한 라이드셰어링(Ridesharing) 시스템이 증가함에 따라 저소득층이나 특정 연령대의 접근성에 대한 문제가 함께 제기되고 있다. 이를테면, 나뉘카나 공유자전거의 운영이 스마트폰의 앱을 통한 결제만을 허용할 경우, 스마트폰을 이용하지 않거나, 혹은 앱의 이용에 능숙하지 않거나, 신용카드나 체크카드 등을 결제 수단으로 이용하지 않는(혹은 없는) 시민들의 경우에 공유 시스템의 향유에 있어서도 불평등이 생길 수 있다는 점이 고려되어야 한다. 특히, 저소득층이나 노년층 등이 지역에서의 시스템 이용의 기회조차 공평하게 주어지지 않는 상황이 발생하지 않도록, 이용의 활성화를 위한 충분한 논의가 이루어져야 할 것이다.

[해외사례] 미국 마이크로 모빌리티 영역에서의 저소득층 이용 방안

마이크로 모빌리티(Micro Mobility)는 일반적으로 전기 등의 친환경 동력을 이용한 소형 이동수단을 뜻하는 말로, 전기스쿠터, 전기자전거, 전동식 키보드 등 일반적으로 50피트 미만의 단거리 이동을 위한 1인 운송수단을 의미한다. 마이크로 모빌리티 프로그램은 그동안 저소득층이 아닌 중상류층을 위한 시설이라는 비판이 있어 왔으나, 최근의 연구들은 소형 이동수단과 대중교통의 연계가 저소득층 그룹에서 확연한 증가를 보여주고 있으며, 이는 개인 차량을 이용하기 어려운 계층에게 마이크로모빌리티-대중교통을 이용한 통행이 점차 증가하고 있음을 시사한다. 뉴욕시는 씨티바이크 이용에 있어 저소득층 아파트 주민들에게 1년 60달러, 1달 5달러까지 할인해주는 프로그램을 제공하고 있다. 또한, 전기 스쿠터 스타트업인 라임(Lime)은 “뉴욕시의 교통 불평등은 즉각적인 해결을 필요로 하는 수준”이라는 것을 서비스 운영의 주요 모토 중 하나로 내걸며 단순한 규제 완화나 스쿠터 공유사업의 산업적 필요성보다는 커뮤니티에 어떤 효용을 제공할 수 있을지를 적극적으로 의제화하는 움직임을 만들어내고 있다. 그 일환으로 저소득층에게 기존가격에서 50% 할인된 가격(일반자전거의 경우 95%, 전기자전거와 스쿠터의 경우 50%)으로 서비스를 제공하는 라임액세스(Lime Access) 프로그램을 만들어 운영 중이다. 공유 운송서비스 업체인 Lyft 역시, 콜로라도 덴버 지역에서 전기 스쿠터 공유서비스를 런칭하면서 1/3에 해당하는 전기스쿠터를 기존 대중교통에서 소외된 저소득층 거주지역(Opportunity Zone)에 집중 배치할 것을 강조하였다. 캘리포니아 샌프란시스코 베이 지역에서도 저소득층을 위한 공유 액세스 개선을 위해 자전거 공유 스테이션을 저소득층 지역과 대중교통 이용률이 높은 지역에

배치하며, 할인된 가격 프로그램을 개발하였으며, 여성들의 이용률을 높이기 위한 무료 이용 프로모션 행사도 진행하고 있다.

마이크로 모빌리티의 운영 방식에 있어서의 접근성 문제도 아직 의견이 분분하다. 크게 도크리스 방식(정해진 반납 장소 없이 아무 데서나 대여하고 반납할 수 있는 방식)과 스테이션 방식(정해진 정류소에서 반납과 대여가 이루어지는 방식) 중 어느 방식이 사용 접근성에 불평등을 줄일 수 있을 것인가에 대해서는 합의가 이루어지지 않았다. 도크리스 시스템은 바이크를 잠금 해제하기 위해서는 QR 코드를 스캔할 수 있는 스마트폰이 필요하며, 바이크를 찾아야 할 때에도 모바일 앱을 설치하고 이를 통해 지도를 참조해야 한다는 점에서 스마트폰이 없는 사람들에게 사용의 어려움을 가져다줄 수 있다. 또한 스테이션 방식은 상대적으로 부유한 커뮤니티를 대상으로 서비스를 제공하고 있다는 비판을 꾸준히 받아왔기 때문에, 소외계층의 교통 접근성을 향상시킬 수 있을지는 의문이다.

이에 미국 교통 및 지역사회연구소(National Institute for Transportation and Communities, NITC)는 공공바이크 셰어링의 접근성을 높이기 위해 사카고, 필라델피아, 브루클린 등의 커뮤니티를 대상으로 저소득층과 유색인종을 중심으로 한 이용실태 설문조사를 실시해 왔으며, 더 나은 공유자전거 파트너십(Better Bike Share Partnership)과 같은 단체는 평등한 마이크로 모빌리티의 이용을 위한 툴킷(Toolkit) 개발과 보고서, 정책 방안 등을 끊임없이 연구해 오고 있다 (<https://betterbikeshare.org/resources/>).

한편, 폭염에 대비한 자전거 전용도로의 이용 활성화 방안도 고려되어야 할 것이다. 여름철 무더위 또는 겨울 한파와 같이 야외활동이 어려워지는 극한 기후환경을 대비하여 자전거 도로망과 쉼터의 운영시간의 연계성도 고려해볼 수 있을 것이다.

마지막으로 유소년층의 기후위험 노출도가 높았던 지역들에서는 전기 통학버스의 우선적인 시범 운영을 통하여 온실가스 저감과 미세먼지의 축소가 실질적 효과가 있는지 테스트해볼 필요가 있다.

(4) 공원·녹지 시설을 활용한 기후변화 위험지역의 도시환경 개선 방안

본 연구의 4장 2절에서 살펴보았듯이, 미세먼지 노출도의 경우 노동인구와 고령인구가 비슷한 노출도에 있는 것으로 나타났는데 도심이나 북부 지역에서 가장 취약한 것으로 조사되었으며, 초미세먼지 노출도의 경우 미세먼지 노출도와 비슷한 결과를 공유하였다. 따라서 앞서 논의한 바와 같이, 기후변화의 주요 원인인 온실가스 흡수원인 공원·녹지 시설을 확충하는 것이 미세먼지를 저감하는 직·간접적인 방안이 될 수 있을 것으로 기대된다. 기후변화에 대비한 녹지 확충의 효과는 긍정적인 측면과 부정적인 측면을 모두 고려해야 한다. 미세먼지 저감 및 정신건강에 있어서의 긍정적인 요소도 있지만, 한편으로는 연평균 기온의 증가로 인해 수목의 꽃가루 발생 시기의 증가로 인하여 알레르기성 질환의 증가가 부정적인 요소가 우려되기도 한다. 따라서 녹지의 확충은 취약계층이 위험요소에 따른 영향을 충분히 고려하여 적절한 위치 선정과 규모, 수목의 조성 등을 면밀히 따져 계획하여야 할 것이다.

현재 계획 중인 서울시의 공원·녹지 부문 조성사업으로는 도심공원의 확충, 산림환경 관리, 가로수 띠녹지 조성, 사회공헌형 탄소상쇄 숲 조성 등이 있다. 특히, 서울시는 2022년부터 35만 제곱미터의 미세먼지 저감 조림을 조성하고 이를 확대하여 2026년까지 5년 동안 총 195만 제곱미터의 조림 형성을 목표로 하고 있다(서울연구원, 2022). 마찬가지로 미세먼지 저감 공익 숲가꾸기 사업의 일환으로 매해 5백만 제곱미터의 숲을 조성하여 총 2천 5백만 제곱미터의 숲가꾸기 사업을 통해 4천 톤의 온실가스 감축을 최종목표로 하고 있다.

본 연구에서 밝힌 미세먼지·초미세먼지의 노출 위험도가 높은 지역은 이러한 미세먼지 저감 조림 사업에 있어 우선적인 위치 선정을 제안하는 데에 중요한 데이터로 작용할 수 있을 것으로 기대해본다. 또한, 본 연구의 고해상도 데이터의 이용의 장점을 살려, 해당 연령그룹의 지역별 노출도와 노출 시간대를 고려하여 녹지의 적합성과 운영방침, 가로수 식재의 선정 등에 중요한 자료를 제공하여 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3_기후변화 대응을 위한 빅데이터의 활용방안

1) 기후변화에 대비한 시민들의 IoT 센서 활용

S-DoT 환경 센서는 앞으로 스마트시티와 디지털 트윈 테크놀로지의 촉매제로서 활용될 수 있는 충분한 가치를 지닌 도시 자산이다. S-DoT에서 측정·수집되는 도시 데이터는 시민들이 실제 생활하는 도시공간에 설치되어 다양한 정책의 근거로 활용되거나, 학계, 산업계에서 새로운 가치를 창출해내거나 서비스를 개발하는 등 다양한 용도로 활용되어야 한다.

극한기상의 빈도와 강도가 심해짐에 따라 환경의 측면에서 S-DoT의 활용은 더욱 기대가 되는 부분이다. 빅데이터를 기반으로 한 기후 분석은 보다 정확하게 폭염 및 한파 데이터를 분석하여 온도의 변화나 온열지수, 체감온도 등을 예측하고, 이에 대비하여 그늘막 또는 빙판길의 열선 설치, 실시간 정보 전달을 위한 모니터링 시스템, 예·경보제 등과 연계하여 도시민들의 기후대응을 민첩하게 준비할 수 있는 근거가 되어야 한다. 또한 미세먼지와 관련하여 지역 단위의 모니터링이 가능해진다면, 호흡기·알레르기 관련 기저질환을 가진 환자들을 위한 다양한 대응 방식들을 도시 서비스의 차원에서 제공할 수 있을 것이다. 현재의 S-DoT 환경 센서와 유동인구 분석에 쓰인 모바일 데이터는 서울 열린 데이터장(<http://data.seoul.go.kr>)에서 오픈 소스로 제공하고 있다. 데이터의 분배 차원에서

시민들에게 실시간 도시 생활환경정보를 제공한다는 점은 시민들이 스마트 서비스를 체험, 발굴하고 그 데이터와 플랫폼을 기반으로 삶의 질 향상을 위해 다양한 분야의 활용도를 높일 수 있다는 점에서 매우 환영할 만한 일이다. 다만, 서울시의 스마트시티 정책이 장기적으로 성공하기 위해서는 데이터의 탈중심화에 대한 논의 또한 심도 있게 이루어져야 할 것이다. 단순히 데이터 이용에서의 탈중심화를 넘어 궁극적으로 센서의 설치, 관리, 보급에서의 시민들의 참여는 어디까지 이루어질 수 있을지, 데이터의 제공범위와 포맷의 결정에 대하여 시민들의 결정권은 어디까지 가능할지 등 보다 다각적인 방면에서의 데이터 탈중심화에 대한 논의가 필요한 시점이기도 하다.

이를테면, 커뮤니티 맵핑을 통해 시민들이 직접 S-DoT 센서가 추가로 필요한 지역을 맵핑하거나, 센서의 설치 기준을 정하고, 점차적으로 데이터의 주체자로서 역할을 해나갈 수 있도록, 더 쉽고, 안전하고, 투명하고, 직관적인 접근방식에 대해서도 고민해보아야 할 것이다.

2) 기후 취약지역에서의 IoT 센서 활용

본 연구에서의 가장 큰 성과는 S-DoT 센서와 모바일 유동인구 데이터를 통해 마이크로 스케일로 동 단위 기후취약도를 분석할 수 있었다는 점이다. 이는 고해상도의 데이터를 통해 더 세밀한 도시의 환경정보를 수집할 수 있고, 이에 대응할 수 있는 가능성을 보여준다. 정책적인 측면에서, 각 지역의 특성과 도시환경의 특성이 다르기 때문에, 기후변화에 대응하는 세부적인 지침들은 지역의 특색에 맞게 맞춤형으로 제안될 수 있을 것이고, 본 연구가 추후 더 발전된다면 동별 기후 위험요소와 취약계층, 재정 여건 등에 맞춘 지역 표준 마련의 근거가 될 수 있을 것이다.

또한 IoT 환경 센서를 통한 오존 농도의 모니터링에서의 활용도도 제안해볼 수 있는 요소 중 하나이다. 서울시의 오존 농도는 지속적으로 증가하고 있어 이와 관련하여 오존의 전구물질 저감 및 취약집단의 노출 저감 대책이 추가적으로 필요한 상황이다. 현재 S-DoT 도시데이터 센서에서는 오존 농도를 측정하고 있지는 않으나, 이미 다른 국가의 도시들에서는 센서를 통한 오존 측정이 연구와 도시 계획에 이용되고 있다. 향후 도시의 기후위험요인을 대비한 통합적 모니터링을 위하여 대기 중 오존농도 측정망을 확충하고, 농도 및 노출 저감을 위한 지역별 맞춤형 대책 마련이 이루어진다면, IoT 환경 센서의 활용도는 더 높아질 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 진행하지 않았으나, 추후 유동인구를 보다 면밀히 분석한다면 시민들의 활동에 맞춘 기후 대응방안도 제시할 수 있을 것으로 본다. 이를테면, 단순히 보행의 기

중점 분석(O/D analysis)을 넘어, 활동상의 위계를 분석하여 목적성을 가진 보행활동(출·퇴근, 운동, 장보기, 영유아 등·하원 등)이 이루어지는 시간대와 지점을 분석하고, 해당 기후위험 요소를 모니터링하여 시민들에게 맞춤형 대응 서비스를 제공할 수 있을 것이다. 혹은, 폭염 시 노년층 취약지역에서 더 빠른 대응이 이루어질 수 있도록 IoT 센서와 응급처치 시설의 연계 등을 구축해볼 수 있을 것이다.

[해외사례] 이동형 센서 및 통합 데이터를 기반한 동적 열지도 개발

텍사스 오스틴시는 미국 남부에 위치한 도시로, 여름이 6월부터 9월까지 평균 일일 기온이 32°C 이상인 지역이다. 이상기온으로 인한 폭염에 대비하여 텍사스 대학교 오스틴에서는 오스틴시, 커뮤니티 그룹 및 주민들과 협력하여 고온이 사람들에게 가장 큰 영향을 미치는 곳을 찾아내기 위하여 동적 히트맵 연구를 진행하고 있다. CAPA Heat Watch 프로그램은 세 가지 주요 목표를 가지고 진행하고 있는 프로젝트로, (1) 사람들 실제 측정되는 온도와 함께 어떻게 열을 경험하게 되는지 동적 히트맵을 개발하고, (2) 이 지도를 이용하여 더위를 경험하는 지점들을 효과적으로 식별 수 있는 전략들을 개발하며, (3) 지역사회 주민과 도시의 의사 결정자들에게 데이터와 잠재적인 해결책을 공유하는 것을 목표로 하고 있다. 위성 데이터, 지상 센서 및 컴퓨터 모델을 조합하여 개발되는 열 지도는 텍사스 중부 전 지역을 아우르는 온도 지형을 볼 수 있을 것으로 기대된다. 이에 더불어, 프로젝트 팀은 측정과 모델이 커뮤니티 경험이 일치하는지 확인하기 위해 초기 연구 디자인에서부터 거주자의 의견을 통합하여 커뮤니티의 온도 핫스팟에 대한 논의에 참여하고 온도 맵에 대한 피드백을 받는다.



[사진출처] 2020년 8월 오스틴에서 수집된 오후 기온의 지도로, 파란색은 낮은 온도, 빨간색은 높은 온도를 나타낸다.
(<https://www.jsr.utexas.edu/news/2021/06/ut-austin-teams-up-with-city-and-community-to-fight-extreme-heat-in-austin/>)

[그림 5-기] 이동형 센서 및 통합 데이터를 기반한 동적 열지도

3) 기후변화 대응을 위한 유동인구 모바일 데이터의 활용

S-DoT 환경 센서뿐만 아니라, 본 연구에서 이용한 모바일 통신 데이터 기반 유동인구 데이터 또한 그 활용도가 기대된다. 유동인구 데이터는 인구 통계 데이터(Census)와는 달리 한 지점에서 특정 시간에 위치한 사실상의 인구(de facto population)를 가늠할 수 있다는 점에서 특정 시간대와 지역에서의 인구 분포 양상, 지역별 차이 등을 확인할 수 있다. 추후 유동인구 데이터를 활용한다면 기후위험 지역에서의 대중교통 시설을 이용할 때 위험도가 얼마나 증가할 것인지, 지역별 저감 정책이 어떤 그룹을 대상으로 어떻게 이루어져야 할 것인지 심층적 대안을 마련하여 공공서비스를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 통신기업들과 서울시와의 꾸준한 연계사업을 통해 양질의 데이터를 제공받는 것도 필요할 것이다. 개인 정보 이용의 문제점을 지속적으로 해당 기업과 논의해나가며, 정책 연구와 시민들의 기후 안전을 위하여 제공할 수 있는 데이터의 질과 양을 늘려나갈 필요가 있다.

지난 코로나의 위기에서 유동인구 빅데이터가 경제·자유·방역의 정책 수립에 주된 근거로서 다양하게 이용되어온 만큼, 기후변화의 위기에 있어서는 일상생활에서의 이동패턴과 유동인구의 변화, 인구 밀집도의 분석에서 정확하고 세밀하며, 신뢰도가 높은 투명한 정책 수립의 근거로서 이용될 수 있도록 그 틀을 강화해야 할 것이다.

참고문헌

- 강찬수, 2021, “서울 7월 폭염, 27년 만에 기록 갱신… 모든 기록 다 녹일 듯”, 중앙일보.
<https://www.joongang.co.kr/article/24110418/>
- 고영득, 2019, “서울 초미세먼지 농도·나쁨일 수 4년 새 2배 급증”, 경향신문.
<https://www.khan.co.kr/local/local-general/article/201903061006001/>
- 고현실, 2022, “서울시, 올여름 무더위쉼터 3400여 곳 운영…1천여 개 시설 점검”, 연합뉴스.
<https://www.yna.co.kr/view/AKR20220512023000004>
- 관계부처합동, 2020, 「제3차 국가 기후변화 적응계획 (2021-2025)」.
http://www.climate.go.kr/home/cc_data/policy/3_nation_climate_change_adaptation_step_summary.pdf
- 김유정, 2019, “미세먼지 민원 매년 2배 급증… 건강 악화와 생활 갈등 발생”, 케미컬뉴스.
<http://www.chemicalnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=191/>
- 김창섭, 2018, “기후대응, 감축과 적응의 조화가 관건이다”, 「전기저널」, 1(1).
- 서울 스마트시티데이터 프로젝트, 2019. “서울 스마트시티데이터 프로젝트”, <http://damoa.io/>
- 서울시, 2022. “서울시 아토피 천식 안심학교 운영 (환경성질환 예방관리)”
<https://news.seoul.go.kr/welfare/archives/229489>
- 서울연구원, 2022, 「서울특별시 기후변화대응 종합계획 (2022-2026) 수립연구」.
- 서울특별시 정보기획관 · KT BigData 사업지원단, 2018, 「서울 생활인구추계 매뉴얼」.
- 이효상, 2022, “불평등한 폭염에 노동자들이 쓰러진다”, 경향신문.
<https://m.khan.co.kr/national/national-general/article/202208201401001>
- 안상미, 2021, “종로구 창신동 쪽방촌 사라진다… 4개 구역으로 나눠 정비사업 추진”, 환경집코노미.
<https://www.hankyung.com/realstate/article/202112020255i>
- 안현찬 · 손창우 · 신인철 · 장익현 · 박현찬 · 조항문 · 김정아 · 이정현 · 이혜림 · 최지원, 2021, 「폭염과 서울시민의 생활양식 변화」, 서울연구원.

이지혜 · 김형중, 2019, “생활인구 데이터를 활용한 노인인구 공간적 분포 및 군집 분석: 서울시 중심으로”, 「디지털콘텐츠학회논문지」, 20, pp.1365~1371.

정종철 · 이상훈, 2019, “서울시 토지 이용과 교통량에 따른 미세먼지의 공간 분포”, 「지적과 국토정보」, 48(1).

Barbour E, Davila CC, Gupta S, et al., 2019, “Planning for sustainable cities by estimating building occupancy with mobile phones”, *Nature communications*, 10(1), pp. 1–10.

Basu R and Ostro BD, 2008, “A multicounty analysis identifying the populations vulnerable to mortality associated with high ambient temperature in California”, *American journal of epidemiology*, 168(6), pp. 632–637.

Baz-Lomba JA, Di Ruscio F, Amador A, et al., 2019, “Assessing alternative population size proxies in a wastewater catchment area using mobile device data”, *Environmental science & technology*, 53(4), pp. 1994–2001.

Chen Z and Yeh AG-O, 2022, “Delineating functional urban areas in Chinese mega city regions using fine-grained population data and cellphone location data: A case of Pearl River Delta. Computers”, *Environment and Urban Systems*, 93: 101771.

Clougherty, J. E., and Kubzansky, L. D., 2009, “A framework for examining social stress and susceptibility to air pollution in respiratory health” *Environmental Health Perspectives*, 117(9), pp.1351~1358.

Cho S and Lee G, 2021, “Spatiotemporal Multi-objective Optimization for Competitive Mobile Vendors' Location and Routing Using De Facto Population Demands”, *Geographical Analysis*.

Ho, H. C., Wong, M. S., Yang, L., Chan, T.-C., and Bilal, M., 2018, “Influences of socioeconomic vulnerability and intra-urban air pollution exposure on short-term mortality during extreme dust events”. *Environmental pollution*, 235, pp.155~162.

Inostroza, L., Palme, M., and de la Barrera, F., 2016. “A heat vulnerability index: spatial patterns of exposure, sensitivity and adaptive capacity for Santiago de Chile”, *PLOS one*, 11(9).

Kang H, Zhu B, Zhu C, et al., 2019, “Natural and anthropogenic contributions to long-term variations of SO₂, NO₂, CO, and AOD over East China”, *Atmospheric Research*, 215, pp. 284–293.

Kim D-W, Chung J-H, Lee J-S, et al., 2014. “Characteristics of heat wave mortality in Korea”, *Atmosphere*, 24(2), pp. 225–234.

Kim D-W, Deo RC, Chung J-H, et al., 2016. “Projection of heat wave mortality related

to climate change in Korea", *Natural Hazards*, 80(1), pp. 623-637.

Kim, D.-W., Deo, R. C., Lee, J.-S., and Yeom, J.-M., 2017. "Mapping heatwave vulnerability in Korea", *Natural Hazards*, 89(1), pp. 35-55.

Krous HF, Nadeau JM, Fukumoto RI, et al., 2001, "Environmental hyperthermic infant and early childhood death: circumstances, pathologic changes, and manner of death", *American journal of forensic medicine and pathology*, 22(4), pp. 374-382.

Lee H, Choi S and Jiao J, 2021a, "Examining the COVID-19 effects on travel behavior using smart IoT sensors: A case study of smart city planning in Gangnam, Seoul", *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, pp. 347-362.

Lee, H.K., Jiao, J., and Choi, S.J., 2021b, "Identifying spatiotemporal transit deserts in Seoul, South Korea", *Journal of Transport Geography*, 95.

Lee J-T, Kim H, Song H, et al., 2002, "Air pollution and asthma among children in Seoul, Korea", *Epidemiology*, 13(4), pp. 481-484.

Lee J-T, Shin D and Chung Y, 1999, "Air pollution and daily mortality in Seoul and Ulsan, Korea", *Environmental health perspectives*, 107(2), pp. 149-154.

Lee WK, Lee HA, Lim YH, et al., 2016, "Added effect of heat wave on mortality in Seoul, Korea", *International journal of biometeorology*, 60(5) pp. 719-726.

Luber G and McGeehin M, 2008, "Climate change and extreme heat events", *American journal of preventive medicine*, 35(5), pp. 429-435.

Makri, A., and Stilianakis, N. I., 2008, "Vulnerability to air pollution health effects", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 211(3), pp.326-336.

Martins, M., Fatigati, F., Vespoli, T., Martins, L., Pereira, L., Martins, M., . . . Braga, A., 2004, "Influence of socioeconomic conditions on air pollution adverse health effects in elderly people: an analysis of six regions in Sao Paulo, Brazil", *Journal of Epidemiology & Community Health*, 58(1), pp. 41-46.

Muller, C. L., Chapman, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T., & Cai, X., 2013, "Sensors and the city: a review of urban meteorological networks", *International Journal of Climatology*, 33(7), pp. 1585-1600.

Sima, L., Thomas, Y., and Lowrie, D., 2017, "Occupational disruption and natural disaster: Finding a &new normal in a changed context", *Journal of Occupational Science*, 24(2), pp.128-139.

Smoliak, B. V., Snyder, P. K., Twine, T. E., Mykleby, P. M., & Hertel, W. F., 2015, "Dense network observations of the Twin Cities canopy-layer urban heat island", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(9), pp. 1899–1917.

Song C, Qu Z, Blumm N, et al., 2010, "Limits of predictability in human mobility", *Science*, 327(5968), pp. 1018–1021.

Wang, R., and Liu, C., 2013, "Bicycle-transit integration in the United States, 2001–2009", *Journal of Public Transportation*, 16(3).

Wilson, B., and Chakraborty, A., 2019, "Mapping vulnerability to extreme heat events: lessons from metropolitan Chicago", *Journal of Environmental Planning and Management*, 62(6), pp.1065–1088.

[https://www.weather.go.kr/\(기상청\)](https://www.weather.go.kr/(기상청))

[https://kdca.go.kr/index.es?sid=a2/\(질병관리청\)](https://kdca.go.kr/index.es?sid=a2/(질병관리청))

[https://data.seoul.go.kr/\(서울 열린데이터광장\)](https://data.seoul.go.kr/(서울 열린데이터광장))



작은연구 좋은서울 22-14

서울시 폭염 및 미세먼지
노출 위험도 분석

발행인 박형수

발행일 2022년 12월 30일

발행처 서울연구원

비매품

06756 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57

이 출판물의 판권은 서울연구원에 속합니다.