

변화하는 기후에서 보건 및 재난 대응을 위한 다학제간 연구에 대한 정책적 제안

Policy proposals for multidisciplinary research for health and
disaster response in a changing climate



변화하는 기후에서 보건 및 재난 대응을 위한 다학제간 연구에 대한 정책적 제언

Policy proposals for multidisciplinary research for health and
disaster response in a changing climate



위 원 장

김 호 근 (한국과학기술한림원 정회원, 연세대학교 교수)

부위원장

전 혜 영 (한국과학기술한림원 정회원, 연세대학교 교수)

위 원

김 우 택 (한국과학기술한림원 정회원, 연세대학교 교수)

김 창 수 (연세대학교 교수)

신 동 천 (한국과학기술한림원 정회원, 연세대학교 교수)

윤 동 근 (연세대학교 부교수)

이 지 현 (연세대학교 교수)

전 혜 영 (한국과학기술한림원 정회원, 연세대학교 교수)

홍 진 규 (연세대학교 부교수)

자문위원

손 명 세 (연세대학교 교수)

권 원 태 (국회기후변화포럼 기후변화정책연구소장)

요 약 문

연구과제명	국 문	변화하는 기후에서 보건 및 재난 대응을 위한 다학제간 연구에 대한 정책적 제안		
	영 문	Policy proposals for multidisciplinary research for health and disaster response in a changing climate		
연구책임자	성 명	김 호 근	한림원 소속부	의약학부

1. 연구의 목적

우리 사회의 지속가능성과 안정성을 위협하는 자연재해와 기후변화를 대비하는 다양한 정책과 연구개발이 진행되고 있다. 하지만 정책 수요와 기후 과학은 아직 서로 마주하기 어려운 불확실성의 괴리에 있다. 본 과제는 단순하고 명백한 전구 기온 상승이라는 사실을 넘어서 오늘 우리 사회의 재난 방지와 보건을 위한 우리나라 기후 과학의 나아갈 방향을 제시하고, 이러한 과학적 지식에 기반한 정책을 위한 성찰의 계기를 마련하고자 한다. 이를 통해 오늘 우리 사회의 안전함이 앞으로 다가오는 100년 동안 지속가능하게 하기 위한 대기 과학의 원천 기술과 인문사회경제학에 기본 융합 정보를 제공하는 정책과의 연관성을 언급하고, 이와 관련된 도시 규모에서의 기후 및 환경 문제를 에너지, 보건 및 재난의 측면을 살펴보았다.

○ 이를 위하여 본 과제에서는 다음의 내용을 조사 분석하였음

- 재난 및 보건 측면에서 주요하게 다루어져야 하는 최근의 생태계의 급격한 변화, 극한 기상 현상과 우주 재난의 중요성
- 도시 및 지역 규모에서 기후 과학의 불확실성이 가지는 재난 방재에서의 의미
- 도시화에 따른 기후변화와 도시 개발과의 상호 작용 탐색
- 새로운 기후변화의 특성과 이를 재난 경제성 평가에 반영해야하는 필요성

- 새로운 기후 과학과 재난 방지 측면의 패러다임 전환을 고려하는 연구기관의 필요성과 연구 방향 제시

○ 지속가능한 사회를 위협하는 기후변화의 새로운 측면

- 지구온난화는 전 지구 평균 기온의 상승을 의미하며 이에 대한 광범위한 관측적 증거가 존재함
- 최근 일어나고 있는 극한 기상 현상인 폭염, 가뭄, 폭우, 우주 재난 등은 지구온난화가 가속되면서 그 발생 가능성과 빈도도 계속 증가할 것으로 예측됨
- 우리 사회시스템의 근간을 흔들 가능성이 높은 자연 현상으로는 급격한 생태계 변화 및 기후변화, 비가역적 변화, 태양변동성과 지구 자기장 변화 등을 꼽을 수 있음
- 이러한 자연 현상은 현재 우리 사회의 방재 체계를 넘어서며, 식량, 수자원, 건강, 통신에 직접적으로 매우 큰 피해를 미칠 것임
- 우리나라도 지난 20여 년간 기후 과학 분야에서 우수한 연구 업적에도 불구하고 우리 사회의 안정성을 크게 위협할 수 있는 현상에 대한 기초 기술과 직접 관측 기반의 감시 기술, 전층 대기 모델링, 태양 변동성 효과 연구 등은 우리나라에서 소극적인 지원만이 이루어짐
- 지구온난화와 극한 현상 발생에 대비하고, 감시하며 예측하기 위해서는 단순히 단기간에 일기예보 향상을 위한 기상기술에서 벗어나 관련 핵심 과학 기술 개발에 핀 포인트 지원이 필요함
- 재난 방재를 통해 보다 많은 국민에게 혜택이 돌아가고 재해 취약계층을 보호하여 사회의 안정성과 지속가능성을 높이기 위해서는 정책과 과학기술 사이의 불확실성의 괴리를 줄일 수 있는 원천 과학 기술 개발이 필요함
- 지역 및 도시 규모에서의 과학적 연구는 정밀한 관측망 구성을 위한 기술과 인공위성 및 직접 관측 자료의 처리 및 해석에 대한 전문가 양성이 필요함. 이러한 관측 기반 연구는 관측망 구성 및 디자인에 대규모 연구비가 필요할 수 밖에 없으나 그 혜택은 매우 큼

○ 기후, 에너지, 재난과 도시 재개발

- 전 세계적으로 도시화는 급격하게 진행되고 있으며, 우리나라의 경우 전인구의 90% 이상이 도시 지역에 거주하고 있음. 이에 따라 향후 미래 방재 정책의 핵심은 도시 및 국지 규모에서 이루어져야함
- 도시 기후 및 환경은 도시 개발과 확장 방법과 디자인에 따라 크게 달라질 수 있음을 인지해야함
- 모든 인류의 과학적 성과는 상당 부분 공유되어왔으나 도시 및 국지 규모의 과학적 성과는 지역의 특성에 맞게 해석되고, 연구 개발되고, 정책에 반영되어야함
- 도시 개발에서 복합 재난에 대비하는 효과적인 방재 정책은 에너지 사용의 효율화 및 온실가스 배출 감소를 동시에 해결하기 위한 과학기술 및 정책적 고려가 필요함. 이는 지금까지의 대륙 규모에서의 기후 연구에서 국지 규모의 현상에 대한 기초 연구와 모델 개발에 관한 기초 연구가 수행되어야함을 의미
- 지속가능한 도시 건설과 사회시스템의 안정성을 위해서 극한 기후 현상, 우주 재난, 미세먼지, 폭염과 같은 대형 복합 재난 대응을 위한 과학적 측면을 강화할 필요가 있음
- 기후변화에 따른 지속가능한 도시를 위해서 완화 정책 및 적응 정책을 결정하는 데 있어서 국가, 도시 및 구별 정책의 수직적 일관성을 유지하고, 이해당사자와 도시 및 중앙 정부 사이의 수평적 협력 관계가 이루어질 수 있는 제도적 장치 마련이 필요함
- 도시 규모에서의 기후 예측이 어려운 상황에서 정책 실행의 효과를 극대화하기 위해서는 시민 및 이해당사자와의 소통을 강화해야 함
- 도시 재개발이 폭염의 피해를 증가시키거나 감소시킬 수 있음을 인지하고, 향후 100년간 지속가능한 도시를 유지하기 위하여 도시 개발 및 재개발 시에 앞서 언급된 기후변화의 특성, 환경적 측면과 도시 기후학적 측면을 신중하게 고려해야 함

- 도시 개발시 토목, 정보통신 등의 고도화뿐만 아니라 도시의 재개발 및 개발과 건물 구조 변화, 신재생 에너지 발전, 온실가스 배출 감소 등이 가져올 국지 기후 및 대기 환경에 미치는 영향에 대한 전문가 참여와 관련 지식에 기반한 면밀한 검토가 이루어져야 함
- 건축 법규 및 토지 규제 등과 연계하여 건물의 에너지 효율성을 높이며, 건물의 높이를 올리고 녹지 면적 확보 등을 통한 논의가 스마트 시티나 압축 도시 개발 논의에서 중요하게 다루어져야 함
- 효과적인 거버넌스를 위하여 지방 자치 단체, 광역단체, 국가와의 법률적 불일치를 해결해야 함
- 도시 및 지역 규모의 기후 및 기상 현상과 전층 대기에 대한 관측 및 진단을 통한 감시와 기초 연구 수행을 위하여 대학과 대기과학 기초 연구 기관의 설립을 통한 협력 방안을 고민해야할 시점임
- 다양한 종류의 재난이 동시에 발생하는 복합 재난은 우리 사회시스템의 안정성에 큰 위협이 됨. 우리 사회는 각각의 자연재해에 대한 대응 매뉴얼이 있지만 실제로 극한 자연 현상이 동시에 발생했을 때, 각각의 개별 대응 방식은 전혀 작동하지 못하거나 상황을 악화시킬 수 있음을 이해해야 함

○ 기후변화와 보건

- 대규모의 도시화가 빠르게 일어남에 따라 도시는 그 자체로 복합 재난에 취약할 수밖에 없음. 최근 들어 극한 현상으로 인한 건강 피해는 후진국이나 개도국뿐 아니라, 보건시스템이 잘 구축된 선진국에서도 흔히 발생
- 기후변화로 유도된 건강 문제는 도시의 하부구조에 의해서 더 증폭되거나 악화하여 나타날 수 있는데, 적절한 시기에 적절한 대책이 준비되어 있지 않으면 극한 자연 재난 발생에 매우 취약할 수밖에 없음
- 향후 도시 개발 및 재개발 과정에서 에너지, 재난 방재, 보건 향상, 온실가스 배출량, 미세먼지 등을 복합적으로 고려하는 것이 필요함
- 도시 지역은 지구온난화와 도시 열섬 현상의 증첩으로 인하여 극한 현상에 의한 피해에 폭염에 취약함

- 기후변화와 관련하여 도시에 자연재해가 발생하는 경우, 도시의 사회 기반 시설이 제대로 기능하지 못함으로써 다양한 종류의 보건 문제가 발생할 수 있으며, 관련된 질병과 도시에 미치는 효과를 파악하여 우선순위가 필요한 연구 분야를 파악해야 함
- 극한 자연 재해와 복합 재난이 우리 건강에 미치는 영향을 이해하기 위한 연구를 지원하고 이를 정책에 반영해야함
- 폭염은 지구온난화와 도시 열섬으로 더욱더 강한 강도로 더욱 자주 발생할 것으로 예측됨. 이를 대비한 보건시스템의 구축과 장기적인 관점에서 도시 환경에서의 인류의 보건 문제에 대한 이해가 필요함
- 우리나라의 선진적 보건체계의 지속성을 위하여 국민건강보험 재원과 관련된 새로운 재원 모델과 연계하여 극한 기후변화와 복합 재난의 발생을 대비하고, 국민건강보험의 재원 모델과 연계한 지속가능한 보건 체계를 만드는 문제에 대한 준비가 필요함

○ 시민과의 소통의 중요성

- 기후 변화 완화 및 적응 정책의 효과는 도시 및 국지 규모에서 가장 크게 나타날 것이지만 현재 기후 과학 기술은 도시 및 국지 규모에서 가장 큰 불확실성을 가짐. 이에 따른 정책과 과학기술의 괴리를 이해할 필요가 있음
- 이러한 불확실성을 고려하는 방재 체계 구축과 이러한 불확실성을 고려하여 전문가의 신뢰를 확보하는 시민과의 긴밀한 소통이 필요함
- 과학의 불확실성에 대한 시민 사회의 인식을 통해서만 지속적인 원천 기술에의 지원이 가능하며, 이를 기반한 정책의 효과가 극대화될 수 있음을 인식해야 함. 이를 위하여 다양한 이익 단체뿐만 아니라 기후 변화 피해의 취약계층 및 일반 시민들이 원천 기술 개발 과정에 과학자와 소통할 수 있는 다양한 방법이 모색되어야함
- 지속가능한 도시 개발에서 에너지, 수자원, 식량, 우주 재난, 대기 오염 및 폭염 등의 복합적 측면을 고려할 수 있는 전문가의 참여와 지역 시민 사회와의 소통의 폭을 넓히는 것이 필요함

- 도시 개발은 개인의 재산권과 공공성이 크게 부딪칠 수 있으므로 시민과의 소통을 통해 정책과 전문가의 신뢰성을 회복하고 효과적인 다양한 방법을 개발하고 적용해야 함
- 특정 부처의 특정 재난에 대한 정책이 다른 종류의 재난 및 환경 문제를 일으킬 수 있는지, 보다 면밀하고 복합적인 연구와 기초 연구가 필요함
- 전문가 집단의 불신이 가져오는 막대한 사회경제적 직간접 피해에 대한 인식을 통해 다양한 분야의 전문가와 함께 정부 정책의 신뢰를 회복할 수 있는 지역 주민들과의 소통이 요구됨

○ 기후변화에 의한 자연재해의 경제성 평가

- 극한 기상 현상과 급격한 기후변화는 발생 확률은 낮지만 발생하면 미치는 어마어마한 사회경제적 피해 때문에 다양한 방법으로의 연구가 필요함
- 이를 위해서는 지역 및 국지 규모에서 사회경제적 상황을 반영하고 국지 규모의 대기 현상에 대한 연구를 수행하여 다양한 학문적 다양성의 이점을 최대한 창출할 수 있는 대기 과학 기초 연구와 기초 연구 기관의 정립이 필요함
- 발생 확률이 낮은 현상들의 발생을 빠르게 진단할 수 있는 위성 및 관측 자료 기반의 진단 분석 연구가 필요함
- 태양 변동성에 따른 우주 재난과 관련 기후 현상의 유발은 우리나라 우주 개발 계획과 연계하여 주요하게 다루어져야함
- 우리나라에 최근 큰 사회 문제가 된 미세먼지 문제와 지구온난화와 극한 현상의 빈번한 발생은 지난 수십 년간 이루어 낸 우리 과학기술 연구 성과와는 다른 접근 방법과 지원이 필요함
- 복합 재난의 발생과 서로 다른 자연재해가 서로 다른 시공간에 일어날 때 하나의 특정한 재해에 맞추어진 정책은 다른 재난에 매우 취약한 구조를 만들 수밖에 없음을 이해해야함
- 이러한 비선형적이고 복합적인 문제를 해결하기 위해서는 부처 간 학문 간 벽을 허물고 문제 해결 중심의 다학제간 연구가 우리 사회 구성원들의 요구를 충족하기 위해서 시급히 정립되어야 하고 이를 리스크 분석에 포함되어야함

- 주요 자연 재해에 대한 원천기술 연구와 과학적 결과에 기반을 둔 정책적 활용을 가능케 하는 국내 기후 환경 변화에 맞는 기후변화 리스크 평가 방법의 개발이 시급함
- 대형 재난과 복합 재난에 대한 전 세계적인 협력을 위해 채택된 효고 행동 강령 2005~2015(Hyogo Framework for Action 2005~2015) 이후 이를 계승하고 발전시킨 센다이 재난 위험 경감 강령(Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015~2030)이 제시한 국가 및 지역 수준에서의 행동 및 법제화를 빠른 시일 내에 검토하고 실행해야 함
- 우리나라의 환경 및 상황에 맞는 정책 수립 및 평가를 위해 다양한 분야의 전문가들과 이해당사자의 의견이 반영될 수 있는 재난관리 거버넌스 체계를 구축하고 재난 관련 교육을 강화해야 함
- 재난 및 안전 문제에 있어서 세계 최고 선진국이었던 스웨덴도 2018년 260년만의 최고 폭염과 산불로 인하여 엄청난 피해를 받음. 우리나라도 경각심을 가지고 재난 문제에 있어서 그간의 재난방지책에 대한 평가와 보완이 필요함
- 기후변화의 편익 비용 산정 과정이 추적될 수 있도록 해야 하며, 이를 통해 사용된 모델의 한계와 문제점들을 적절하게 평가해야함
- 할인을 산정과 세대 간 차이에 대한 문제 등에 있어서, 극한 기상과 돌이킬 수 없는 급격한 기후변화를 다루기 위한 경제성 평가 연구가 필요함
- 우리나라에 직간접적으로 영향을 줄 수 있는 우주 재난, 극한 현상, 급격한 변화, 지구 자기장 변동과 같은 분야의 연구를 강화함과 동시에, 이를 반영하는 지역 자치단체 수준의 적응 완화 정책을 지원하기 위한 시나리오 기반의 사회과학적 연구, 일반 시민들의 참여 및 교육 프로그램 등이 지속해서 이루어져야 함
- 새로운 기후변화 양상을 이해하고 불확실성을 개선할 수 있는 기초 과학적 소양을 가지고 있으며, 이러한 변화의 사회경제적 측면을 이해하고 적응 및 완화 정책을 지원할 수 있는 싱크탱크 역할을 수행 할 수 있는 과학자를 양성하는 고등기관의 역할에 대한 인식이 필요함. 공공기술 분야에서 대학과 연구기관 및 정책 결정의 연계를 효과적으로 수행하고 있는 독일의 막스플랑크 연구소가 좋은 벤치마킹이 될 수 있음

- 정책 결정자들은 이러한 연계를 지원하고, 장기간의 기초과학 연구에 근거한 원천 기술에 의한 투자와 함께, 대학교의 연계를 통한 대학과 정책 결정자의 새로운 협력 모델로서의 기초 연구가 수행되어야함

○ 본 연구과제를 통하여 지속가능한 우리 사회를 위한 재난 및 보건 정책에 관한 가장 중요한 시사점

- 지구온난화로 인한 단순한 온도상승의 문제를 넘어서, 이와 연관된 폭염, 홍수, 우주 재난, 생태계 급격한 변화 등과 관련된 대기 과학의 기초 연구의 수행과 함께 이를 정책에 반영하여 방재와 보건 문제 해결을 통한 우리 사회의 안정성을 유지하기 위한 새로운 연구 집단이 필요함
- 기후변화에 따른 재난 완화를 위한 정책은 인구 및 물류 등이 밀집되어 재난 발생 시 막대한 인적 및 물적 피해가 발생할 수 있는 도시에 집중되어야함
- 현재 기후과학기술 수준은 도시 및 국지 규모에서 매우 큰 불확실성을 가지게 되며 이는 정책의 괴리를 만들 수밖에 없음. 이러한 정책의 괴리는 정책의 불신과 전문가 집단의 불신을 유발하여 정책의 효과를 크게 떨어뜨릴 수밖에 없음
- 지구온난화는 현실이며, 머지않은 미래에는 더욱 극심한 폭염, 가뭄, 홍수, 지구 자기장 변동 및 생태계의 급격한 변화가 일어날 가능성이 매우 큼. 이는 우리 사회가 과거에 경험해보지 못한 수준이 될 것이며, 우리 사회의 방재 기능을 넘어서 단기간의 재산 및 인명피해를 유발할 뿐만 아니라 장기적으로 식량 부족, 수자원 부족, 에너지 고갈 등의 심각한 문제를 유발할 수 있음
- 급격한 도시화에 따른 인구 집중화에 따라 급격한 자연 변화 및 복합 재난에 대비하는 도시 개발 정책이 즉각적으로 수행되어 도시 개발 정책에 반영되어야 함. 특히 단일 재난에 치중된 방재 및 보건 정책을 재고하고, 재난 방지와 도시의 사회 안전망 구축, 보건시스템, 기후 환경 문제를 함께 고려할 수 있는 전문가 협의체가 필요함

- 그동안 집중된 전 지구 기후 문제 연구에서 탈피하여 도시 및 지역 규모에서의 대기과학 및 전 지구 모델링 원천기술 연구를 장려하고, 미국 및 독일의 기초 연구소를 벤치마킹한 대학과 연계하여 기초 연구 기관의 설립 추진이 필요함. 이를 통하여 장기간의 교육과 연구가 필요한 기초 연구를 후속세대로 자연스럽게 교육하고 연구의 수준을 높일 수 있을 것으로 기대됨
- 향후 개발 및 환경 영향 평가에서 필요한 경제성 평가는 이러한 다양한 기후변화 및 극한 변화의 특성을 고려해야 함
- 우리나라의 선진화된 보편적 의료 체계는 인구 감소에 따른 국민건강보험 재원 마련의 어려움과 연계하여, 향후 다양한 기후변화 가상 상황에 대한 대비와 대책 마련이 필요함
- 우리나라는 전문가 집단의 신뢰 상실로 인하여 정책의 효과가 제대로 나타나지 않거나 사회의 안전성을 해치는 경우가 많이 발생하고 있음. 이를 해결하기 위하여 수직적, 수평적 제도의 의사소통과 합리성을 되살려야 함. 전문가 집단과 이해당사자, 그리고 일반 시민과의 소통을 통한 신뢰 회복은 기후변화와 관련된 보건 및 재난에 있어서 반드시 고려해야 함

목 차

목 차

I. 서 론	1
1. 기후변화와 자연재해	3
2. 지역 특성에 따른 기후변화에 대비하는 재난 및 보건시스템의 중요성	5
3. 복합 재난 방재를 위한 도시 개발	7
II. 동아시아 기후변화 현황 및 전망	9
1. 극한 기후 발생 현황 및 예측	12
2. 비가역적 기후변화	17
3. 도시 기후	20
4. 태양 변동성과 재난	23
III. 도시 개발과 기후변화	27
IV. 기후변화와 보건	37
V. 기후변화에 따른 재난의 경제성 평가	47
VI. 시사점 및 정책 제언	53
1. 기후변화	55
2. 도시 개발과 도시 기후	60
3. 기후변화와 보건	62
4. 재난과 경제성 평가	64
참고문헌	66



표 목 차

〈표 1.1〉 지구온난화에 따른 영향 예측	15
〈표 4.1〉 기후변화와 대기 질과 관련된 주요 건강 위협 요인	42
〈표 4.2〉 기후변화와 관련된 대기 상태 변화와 이로 인한 도시 거주자들의 건강 영향	44

그림 목 차

〈그림 2.1〉 기후모형으로 예측한 일 최고 기온의 연중 최댓값의 20년 빈도수	14
〈그림 2.2〉 기후모형으로 예측한 현재 보다 많은 일 누적 강수 발생 빈도	15
〈그림 2.3〉 지구온난화 시나리오에서 대서양 자오 순환 역전 후 10년간 지면 기온의 변화	19
〈그림 2.4〉 1980년과 2050년의 기온 차이	21
〈그림 2.5〉 도시 기후변화 취약성 및 위험 평가 체계	22
〈그림 3.1〉 기후변화 영향 평가에 있어 주요 인자의 불확실성의 크기	33
〈그림 3.2〉 도시의 형태	35
〈그림 4.1〉 기후변화와 대기 질에 관련된 주요 건강 위협 요인	41



I

서론



I

서론

Policy proposals for multidisciplinary research for health and disaster response in a changing climate

우리나라는 한강의 기적이라는 전 세계에서 유례를 찾아볼 수 없는 빠른 경제 성장과 함께 지난 반세기 동안 정치적, 사회적, 경제적으로 많은 변화를 겪어왔으며, 유아에서 성인으로의 급격한 변화가 일어나는 청소년기의 성장통과 같은 많은 사건과 재난을 겪어왔다. 하지만 이러한 급격한 국가 변화 속에서 재난에 대응하는 우리 사회는 적절한 대처와 시스템 구축에 미흡했던 것도 사실이다. 우리나라에서 흔히 재난 사고가 발생하면 우선 인재라는 것을 의심하는 것도 이와 관련이 있다. 근대 이후 우리나라에 발생했던 다양한 자연재해와 재난 사건의 대가는 매우 컸으며 이를 반면교사로 삼아, 우리의 방재 체계도 꾸준히 향상되어왔다. 하지만 관련 정책의 효율적 작동을 위한 지역 및 도시 규모에서의 대기과학적 원천 지식은 불확실성이 여전히 크지만 그동안 활발한 연구개발 투자가 부족했으며, 단순한 기온 상승 이외에 우리 사회의 안정성을 급격하게 무너트릴 수 있는 급격한 지구시스템 변화와 태양 변동성에 의한 재난 등은 안전하고 건강한 국가를 위한 정보를 제공하기엔 아직 부족한 점이 많다.

1. 기후변화와 자연재해

자연재해와 연관된 지구시스템의 변화는 지난 반세기 동안 우리나라의 경제 성장만큼이나 급변하고 있으며, 기후 과학적 성과들은 지구온난화에 따라 우리의 주변 환경과 기후도 우리 인류가 지금까지 겪어보지 못한 상황이 일어날 것이라고 경고하고 있다. 그동안 우리 사회의 빠른 양적 성장으로 인한 문제에 대한 자성의 목소리와 함께 삶의 질에 대한 욕구도 증가하면서, 자연재해에 대해 국민들은 더욱 엄격하고 정밀한 예방책 마련, 예측 능력 및 사후 대처 능력을 요구하고 있다.

지금 우리 사회는 율로족으로 대변되는 젊은 세대의 삶의 질에 관한 관심 증가와 이로 인한 기존 기성세대와의 갈등, 인공지능의 급격한 발전에 따른 불안과 희망의



공존, 노령 인구의 증가와 젊은 세대와의 갈등, 핵가족화를 넘어선 가족의 파편화, 사회경제적 양극화, 남녀 갈등 등 다양한 문제에 직면해 있다. 특히 이러한 갈등은 최근 우리가 당면하고 있는 다양한 자연 재난에 대한 정책의 효과를 떨어뜨리고 있으며, 일반 대중과 전문가 집단과의 괴리를 크게 하면서 사회의 안정성이 흔들리고 있다. 우리나라는 1990년대 후반 IMF 경제 위기 이후 급속도로 사회 의견이 분열하고, 이전 산업화 과정에서 당연하게 받아들여지던 정책적 판단과 전문가 집단에 대한 신뢰가 무너지고 있으며, 국민과의 소통에 부족한 전문가 집단의 개입이 오히려 갈등을 증폭시키는 많은 사례를 만들어냈다. 이러한 갈등과 불신은 자연재해로 인한 피해가 단순하게 자연재해의 강도에 비례하지 않고, 사회의 구조와 적절한 대응 방안의 부재, 정책 결정자를 위한 과학적 정보 제공의 미비, 그리고 최종적으로 결정된 정책에 대한 불신으로 인해 소규모의 자연재해에도 큰 피해를 겪었던 과거의 수많은 사례에 기인한 것으로, 현재 우리 사회는 다양한 재난 발생에 매우 취약한 구조를 가지게 되었다.

하와이 마우나로아 지역에서 1958년부터 관측되기 시작한 이산화탄소 농도의 급격한 변화는 그동안 우리의 눈에는 보이지 않았던 지구온난화라고 하는 커다란 재난을 전 세계의 많은 사람에게 경고하여왔으며, 이에 대한 과학적 연구가 진행되면서 보이지 않던 위협의 실체를 알게 되었다. 현재 일어나고 있는 기후변화는 보이지 않던 위협에서 폭염, 해수면 상승, 홍수 등의 얼굴로 서서히 그 무서운 민낯을 드러내고 있다. 산업혁명 이후 진행된 지구온난화와 지난 20여 년 동안 일어난 홍수, 가뭄, 전염병의 확산과 같은 자연재해의 빈번한 발생, 그리고, 2007년 기후변화의 심각성을 전파했던 공로로 미국 앨 고어 전 부통령과 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)가 노벨상을 공동 수상하면서 일반 국민도 기후변화의 심각성을 인지하기 시작하였다. 하지만 최근에는 프라임 모기지 사태 이후 전 세계 많은 나라가 겪고 있는 경제 불황과 난민 문제 등으로 인하여 지구온난화에 대한 회의적 시각이 점점 커지고 있는 것도 사실이며, 개개인 및 지방 자치 단체들이 기후변화 완화 및 적응을 위한 개별적 노력을 기울이고 있는 실정이다.

2. 지역 특성에 따른 기후변화에 대비하는 재난 및 보건시스템의 중요성

기후변화에 대비하는 정책 결정 과정의 괴리는 도시 규모에서 발생한다. 이는 급격한 도시화와 이로 인한 모든 인적 물적 피해가 도시에서 일어나지만 아직 기후 과학은 지역 및 도시 규모에서의 기후변화에 대해 아는 것이 많지 않다. IPCC 1차 보고서 발간 이후 기후 과학은 과거 기후변화의 특성과 지구온난화에 대한 원인 분석 그리고 미래 기후변화 특성에 대한 많은 과학적 성과를 이루어 냈다. 최근에는 지구온난화의 원인에 대한 과학적 논쟁에서 벗어나 지구온난화의 실체를 인정하고 그 대비책을 세우는 방향으로 변화하고 있다. 즉 실제 일어나고 있으며 일어나게 될 지구온난화를 어떻게 완화시키고, 우리 인류가 지난 백만 년 동안 겪어보지 못한 환경에 어떻게 적응할 것인가에 관심을 기울이기 시작했다. 특히 IPCC 5차 보고서 발간 이후 우리 사회는 재난 준비 차원에서 기후변화 완화 및 적응 정책이 필요함을 인식하게 되었고, 기후 과학적 성과를 시민 사회에 적절한 방식으로 적절한 시간에 전달하기 위하여 인문사회적 접근과 자연 과학적 접근 방법의 융합에 큰 노력을 기울이기 시작하였다. 최근 Future Earth를 통해 시도되고 있는 자연과학, 공학, 사회 과학, 의학 및 경제학의 융합적 연구가 그 대표적인 예라고 할 수 있다.

이와 함께 효과적 재난 대비와 피해 감소를 위하여 지역 사회에 적절한 정책 마련과 시민들과의 소통이 필요하다는 것도 강조되고 있다. 지난 수십 년간 기후 과학의 상당한 연구 성과에도 불구하고 여전히 도시나 지역 사회가 필요로 하는 기후변화 예측과 진단에는 불확실성이 큰 것이 사실이다. 따라서 정책 결정 과정에 현재의 과학적 불확실성을 고려해야 하며, 동시에 도시를 포함하는 지역 사회의 기후 과학적 연구가 더 활발하고 심도 있게 수행되어야 할 것이다. 특히 도시화는 거부할 수 없는 현상으로, 현재 전 세계 인구의 절반 이상이 도시에 거주하고 있으며 매주 백만 명 정도가 도시로 이주하고 있다. 우리나라는 도시화가 더욱 심해서 시군구 기준으로 인구의 90% 정도가 도시에 거주하고 있다. 이렇게 많은 인구가 좁은 지역에 모여 사는 도시는 재난에 취약하고 극한 기상현상에 의한 피해가 클 수밖에 없다. 최근 과학자들이 주목하고 있는 극한 기상현상과 돌이킬 수 없는



급격한 기후변화가 일어날 때 세계 어떤 지역보다 도시화가 심한 우리나라는 대재앙에 가까운 상황이 경험해야 할 수도 있다.

3. 복합 재난 방재를 위한 도시 개발

기후변화에 따른 재난은 물리적으로 위험한 사건이 취약한 사회 조건과 상호작용했을 때 매우 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 기후변화에 따른 극한 기상 현상에 대한 과학적 이해 및 이의 적절한 예측뿐 아니라 재난 위험을 결정하는 중요한 요인인 사회의 취약성과 노출 정도를 이해하는 것도 중요하다. 역설적으로 기후변화에 따른 이상 기후와 극한 기상 현상들은 그 발생 확률이 적기 때문에 그동안 재난 및 보건 연구에서 적절하게 고려되지 못했다. 하지만 이러한 이상 기후 및 극한 기상 현상들이 더 자주 일어날 것으로 많은 사람이 예측하는 상황에서 우리의 재난 및 보건시스템을 다시 되돌아봐야 할 때이다. 우리나라는 2000년 이후 도시의 재개발을 통한 도시 구조의 변경이 진행되고 있으며, 도시화도 빠르게 일어나고 있다. 이러한 상황에서 우리 사회가 가지고 있는 취약성이 증가할 수 있으며 이는 극한 기상 현상이나 복합 재난이 일어났을 때 우리 사회에 큰 충격을 줄 수 있다. 따라서 재난 및 보건 문제는 기후변화의 과학적 측면과 함께 이해돼야 하며, 동시에 기후변화 과학의 성과도 끊임없이 사회와 소통되어야 한다. 더욱이 우리 사회는 전 세계적으로 유례가 없을 정도로 빠르게 초고령화되어 가고 있으며, 초고령사회는 각종 재난에 취약할 수밖에 없는 구조를 가진다. 재해 대비에 관한 한 최고 수준을 자랑하던 일본도 2018년 여름 동안 폭염으로 구급차에 실려 간 환자가 7만 명을 넘어 통계가 시작된 2008년 이후 최대를 기록했으며, 65살 이상이 전체 환자의 절반을 넘었다. 폭염과 함께 일본은 2018년 7월 초 사흘 동안 내린 폭우로 200여 명이 목숨을 잃는 대형 재난 사고가 발생하였다. 세계 최고의 재난 안전 시스템을 갖추고 있는 일본에서 200명 정도의 희생자가 발생하는 자연재해는 매우 이례적인 일로써 초고령화가 빠르게 일어나고 있는 우리 사회에 시사하는 바가 크다.

우리와 우리 후손들이 앞으로 살아가야 할 21세기에 우리 사회를 보다 안전하고 우리 삶의 질을 떨어뜨리지 않으면서도 우리 후손의 삶의 질을 보장하는 지속가능한 사회를 만들어야 하는 엄중한 책임에 직면해 있다. 본 정책보고서에서는 변화하는 기후 환경 속에서 자연재해와 지구온난화의 효과를 완화하고 우리의 삶을 한 단계 높일 수 있는 몇 가지 주요한 방안들을 제시하고, 지속 가능하며 회복 가능한



우리 사회를 위해 필요한 거시적이고 통시적인 정책적 시사점을 살펴보고자 한다. 이를 위하여 우선 지금까지 진행된 우리나라 기후 과학의 성과와 부족함을 살펴보고 새롭게 준비해야 할 기후 과학적인 측면을 돌아볼 것이다. 이후 이와 관련된 보건 및 재난의 문제를 다루며, 이와 관련된 사회의 특성에 대한 분석을 간략하게 검토할 것이다. 최근 큰 사회 문제가 되는 폭염, 가뭄 및 홍수와 같은 악기상의 빈번한 발생이 가지는 의미를 되짚어보고 그동안 우리 과학기술 연구 방법 및 내용을 검토함으로써 거시적 관점의 대책을 제시하고자 한다.



II

동아시아 기후변화 현황 및 전망



II

동아시아 기후변화 현황 및 전망

Policy proposals for multidisciplinary research for health and disaster response in a changing climate

기후 과학은 5차례의 IPCC 보고서가 나오는 동안 지구 전체 기후의 평균 변화의 진단과 지구온난화를 일으키는 원인을 찾는 연구에서 큰 진전을 이뤘다. 하지만 우리가 현재 대기 현상을 이해하는 수준은 국가 단위에서 매우 큰 불확실성을 가지고 있으며, 도시와 지역 규모에서는 큰 불확실성으로 인하여 정책과의 괴리를 만들어내고 있다. 가장 최근의 IPCC 보고서에서도 이러한 문제를 언급함과 이에 따라 국가별 기후변화 전망이 아닌 대륙별 특성을 분석하고 있다. 이와 함께 평균 변화가 아닌 그동안 발생 확률이 희박했던 현상들과 태양의 변동에 의한 재난, 보건, 기후변화에 대해서도 큰 불확실성이 존재한다.

최근 들어서는 이러한 평균값의 변화 이외에 우리 사회에 큰 영향을 주는 급격한 기후변화 및 돌이킬 수 없는 급격한 기후 현상의 발생과 지구온난화의 관계에 관한 연구가 주요한 연구 주제로 떠오르고 있다. 이 중에서 돌이킬 수 없는 급격한 기후변화는 기후변화의 강제력이 복원되어도 기후 상태는 다시 돌아오지 않는 결과를 말하는데, 이처럼 우리의 예상을 뛰어넘는 변화는 사실 지구의 긴 역사 속에서 많이 일어났다. 현재 대기 중 이산화탄소의 농도를 산업혁명 이전으로 돌렸을 때 더워진 지구의 기온이 다시 산업혁명 이전으로 돌아올 것인지 대한 회의적인 시각도 이러한 연구의 한 예라고 할 수 있다. IPCC 보고서는 급격한 변화를 온실가스 배출과 같은 인류의 강제력에 대한 기후시스템의 빠르고 비선형적인 반응이라고 정의하였다(IPCC, 1996). 이러한 급격한 기후변화의 대표적인 예로는 영화 설국열차의 동기가 된 북대서양의 컨베이어 벨트의 붕괴와 빙상의 급격한 붕괴를 들 수 있다. 이러한 급격한 변화는 대기-해양-육상생태계의 상호 작용 때문에 발생하는데, 그동안 기후변화와 관련된 정치적, 경제적 정책들은 이러한 급격한 변화를 고려하지 않거나 단순히 기후변화 예측의 불확실성으로 취급해왔다. 이는 지구시스템모델의 급격한 기후 변화에 대한 수치 모사 능력에 대한 문제와 더불어 방재 및 보건 정책의 효과를 쓸모없게 만들 수 있는 위험



요인이 되고 있다.

이와 함께 기후의 평균적 변화뿐만 아니라 극한 현상의 변화도 함께 일어나고 있다는 연구 결과들이 발표되고 있다. 앞서 언급된 급격한 기후변화와 마찬가지로 극한 기상 현상들은 발생 확률이 낮으므로 통합 평가 모델에서 제대로 고려되지 못해서 방재 및 보건 정책에 있어 위협 요인이 되고 있다. 일반적으로 극한 기상 및 기후 현상이 우리 사회에 미치는 영향의 강도 및 제반 특성은 극한 현상의 강도, 발생 빈도 및 발생 위치에 의해서 영향을 받을 뿐만 아니라 노출의 정도와 우리 사회의 취약성에 의해서도 영향을 받게 된다. 비록 발생 확률이 낮더라도 이러한 극한 현상이나 급격한 변화는 대형 재난을 일으켜 우리 사회에 큰 충격을 줄 수 있으므로, 우리 사회의 준비 체계가 과연 미래의 극한 현상에 어느 정도 취약한지, 그리고 미래에 발생할 가능성이 큰 극한 현상에 대한 대비는 어떻게 이루어져야 하는지 주도면밀한 분석이 필요하다고 볼 수 있다. 재난 대비의 관점에서 자연재해의 50년 빈도에 대한 대비책은 100년 빈도의 자연재해가 발생했을 때는 거의 무용지물이 될 수 있다는 것을 최근 우리는 일본 후쿠시마 원전 폭발 사고로부터 배울 수 있었다. 따라서 미래에 극한 기상/기후 현상의 발생 빈도가 변하고 발생 강도가 증가할 때 우리 사회는 큰 재난적 위험에 노출될 수밖에 없다. 본 장에서는 이러한 극한 기상/기후 현상의 특징에 대한 간략한 설명과 함께 우리나라를 포함하는 동아시아 지역의 기후변화 특성을 극한 현상과 급격한 변화의 관점에서 요약 기술하였다.

1. 극한 기후 발생 현황 및 예측

가. 우리나라 기후변화 및 재난 현황

IPCC는 2012년 기후변화 적응을 발전시키기 위한 극한 기후의 리스크와 재난 관리(Managing the risk of extreme events and disasters to advance climate change adaption)에 관한 특별 보고서에서 1950년 이후 관측 자료에서 극한 기상 현상의 변화에 관한 증거가 있다고 언급하였다. 이 보고서에서 언급한 우리나라를 포함한 동아시아 지역에서의 지난 과거 동안

관측된 극한 기후 현상의 특성을 종합하면 다음과 같다.

1) 기온의 경우에는 지구온난화에 따라 1961~1990년 기간에 대해 낮과 밤 기온이 각각 10번째 백분위 이하인 날수는 줄어드는 반면에 90번째 백분위 이상의 날수는 늘어날 확률이 90~100%의 확률로 높았다. 하지만 아시아의 경우에는 일 기온의 극한값이 증가하는 경향성은 중간 정도의 신뢰도로 북아메리카, 유럽 및 오스트레일리아와 비교하면 상대적으로 신뢰성이 낮았다(〈그림 2.1〉 참조). 이는 우리나라가 포함된 아시아 지역의 자료 간의 일관성이 상대적으로 부족하다는 것으로 더욱 많은 연구가 진행되어야 함을 의미한다(Min et al., 2015).

2) 폭염은 아프리카를 제외한 대부분 대륙에서 중간 정도의 신뢰성으로 증가한 것으로 나타났다. 하지만 우리나라가 포함된 동아시아의 경우는 중국에서의 연구결과만 보고되었는데, 중국의 경우에 여름철 폭염은 증가하지만, 매우 강한 폭염의 날수는 북중국에서는 증가하는 반면, 남중국에서는 감소하였다(Alexander et al., 2006). 특히 일 최고 기온의 극값들은 온실가스 배출과 같은 인류의 활동으로 유발되었다는 증거가 있다.

3) 폭우의 경우에는 북중미 지역에서 높은 신뢰성을 가지고 1950년 이후로 많은 지역에서 폭우가 증가했지만, 유럽 지역은 몇 가지 상반되는 연구 결과 보고되었다. 아시아 전체 지역을 보서는 충분한 증거가 부족하고, 일관되지 않은 경향성으로 인해서 신뢰성은 작거나 중간 정도 수준이었다. 우리나라가 속해있는 동아시아 경우에는 특히 지역별로 폭우의 증가와 감소가 지역별로 다른 경향성을 보였다(〈그림 2.2〉 참조). IPCC 보고서에는 언급되어있지 않지만, 우리나라의 여름철 강수의 특성이 1990년대 후반부터 변화하였다(Kim et al., 2009). 홍수의 경우는 지표 피복의 변화에 의한 효과와 강수 관측 기록의 부족 등으로 인하여 기후변화에 의한 변화가 있었는지에 대해 신뢰도가 낮았다.

4) 가뭄의 경우에는 북중미 지역에서는 최근 가뭄이 약하지만 감소했다고 중간 정도의 신뢰성으로 나타났다. 반면 유럽에서는 지역별 차이가 컸는데 유럽의 중남부 지역에서는 가뭄이 증가했다는 비교적 일관된 결과가 보이지만 북유럽에서는 가뭄의 증가 신호가 나타나지 않았다. 아시아 지역에 가뭄에 대한 지난 과거의 신호는 낮거나 중간 정도의 신뢰성만을 가지고 있었는데, 동아시아의 경우에는



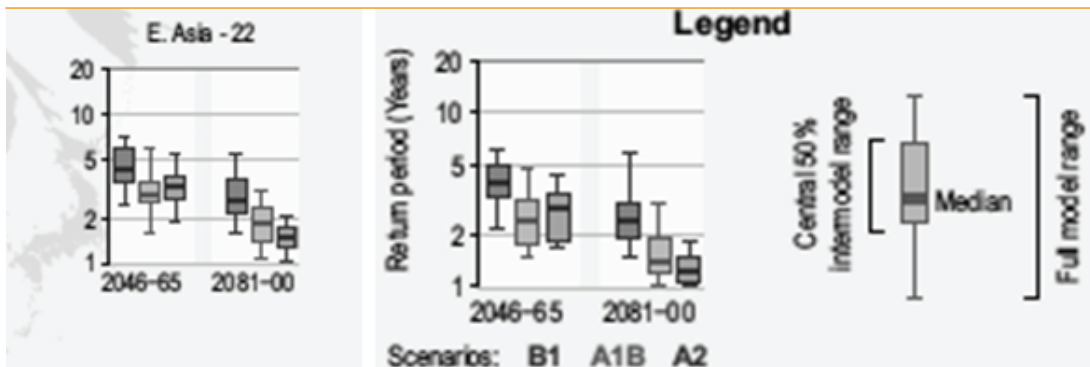
전체적으로 중간 정도의 신뢰성으로 가뭄이 증가했다(Alexander et al., 2006; Sheffield and Wood, 2008; Dai, 2011).

5) 태풍의 강도, 발생 빈도 및 지속시간은 지난 40여 년 동안 증가했다는 사실은 신뢰도가 낮았다.

6) 강풍의 경우에 대해서도 풍속계로 측정한 풍속과 재분석자료의 경향성들 간의 일관성이 부족하고 관련 연구가 많이 진행되지 않았다.

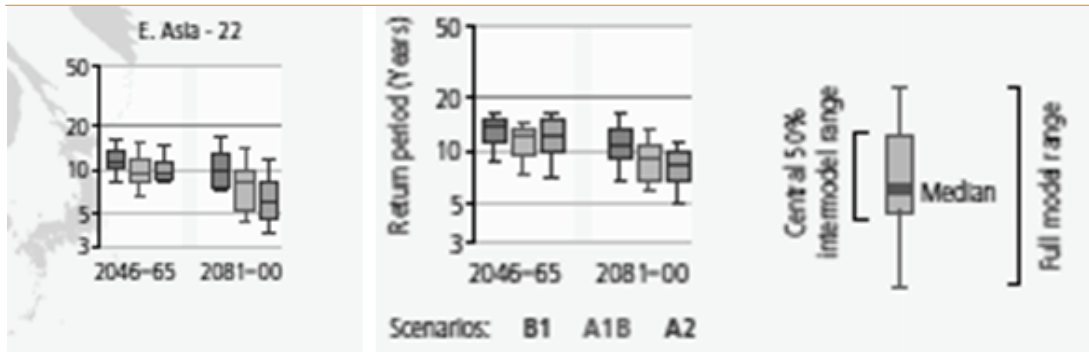
전 지구적으로 평균적 기후변화보다는 극한 현상의 발생과 원인, 그리고 발생 빈도와 강도의 변화 추이에 대한 불확실성은 매우 크다는 것을 알 수 있다(〈표 2.1〉 참조).

〈그림 2.1〉 기후모형으로 예측한 일 최고 기온의 연중 최댓값의 20년 빈도수



주: 기후모형으로 예측한 1980~2000년 동안의 일 최고 기온의 연중 최댓값의 20년 빈도수. 미래에 빈도 주기가 작아짐을 보이며 이에 따라 극한 강수가 더 자주 발생함을 의미함. 각각의 박스에서 다른 색깔은 서로 다른 기후 시나리오 결과를 이야기하며, 보라색, 연두색, 붉은색 박스는 서로 다른 기후 시나리오(B1, A1B, A2)에 해당하며 2016~2065년과 2018~2100년의 예상 값을 표시함. 서로 다른 모델 결과 차이는 박스 크기와 연직 막대 길이로 표시함. 동아시아의 경우 모든 기후 시나리오의 경우에 2016~2065년 평균 폭염 빈도의 중간 값이 5년 빈도 미만임. 보다 자세한 사항은 IPCC(2012) 참조

〈그림 2.2〉 기후모형으로 예측한 현재 보다 많은 일 누적 강수 발생 빈도



주: 기후모형으로 예측한 현재(1980~2000년)보다 많은 일 누적 강수 발생 빈도 (2016~2065년 및 2018~2100년 평균값). 미래에 빈도 주기가 작아짐을 보이며 이는 극한 강수가 더 자주 발생함을 의미함. 각각의 박스에서 다른 색깔은 서로 다른 기후 시나리오(B1, A1B, A2 시나리오) 결과를 의미함. 서로 다른 모델 결과 차이는 박스 크기와 연직 막대 길이로 표시함. 동아시아의 경우 모든 기후 시나리오의 경우에 2016~2065년 평균 폭우 빈도의 중간값은 대략 15년 빈도 미만임. 보다 자세한 사항은 IPCC(2012) 참조

〈표 1.1〉 지구온난화에 따른 영향 예측

	예상 효과	확률 평가	특정 지역에서 높은 확률(67~95%)을 가진 영향의 예
1	거의 모든 육상에서 최고 기온 증가, 고온 일수 증가, 폭염 증가	매우 가능 (90~99%)	- 노년층과 도시 빈민의 사망과 질병 증가 - 가축과 야생 동물의 열 스트레스 증가 - 관광지 이동 - 작물의 피해 위험 증가 - 냉방을 위한 전력사용 증가 - 에너지 공급 안정성 감소
2	거의 모든 육상에서 최저 기온 상승, 저온 일수 감소, 한파 감소, 서리일수 감소	매우 가능 (90~99%)	- 추위에 의한 질병 및 사망률 감소 - 작물 피해 위험 감소 - 전염병 및 매개체 감염 질병의 확산 - 난방 에너지 사용 감소
3	강한 강도의 강수	많은 지역 에서 매우 가능 (90~99%)	- 홍수, 산사태, 이류 위험의 증가 - 토양 유실 증가 - 홍수 유량 및 함양 증가 - 방재, 보험 회사, 개인 및 정부의 재정부담 증가 압력
4	중위도 대륙 내부에서 여름철 가뭄 증가와 관련 리스크 증가	가능 (67~90%)	- 곡물 생산량 감소 - 지면 축소에 의한 건물 기초에 대한 위험성 증가 - 수자원의 양과 질의 감소 - 산불 위험의 증가



	예상 효과	확률 평가	특정 지역에서 높은 확률(67~95%)을 가진 영향의 예
5	열대 저기압의 최대 풍속 증가, 강수 강도 최댓값 및 평균 강수 강도의 증가	일부 지역에서 가능 (67~90%)	- 생명의 위험 증가 - 감염병 및 전염병 위험 증가 - 해안 침식, 해안 건물 및 기반 시설의 위험 증가 - 해안 생태계 위험 증가
6	많은 다른 지역에서 엘니뇨와 연관된 가뭄과 홍수의 강도 증가	가능 (67~90%)	- 가뭄 및 홍수 지속 지역에서의 농업 및 방목장의 생산성 감소 - 가뭄 지속 지역에서의 수력 발전량 감소
7	아시아 여름 몬순 변동성의 증가	가능 (67~90%)	- 온대 및 열대 아시아 지역의 홍수 및 가뭄 크기와 위험 증가
8	중위도 폭풍 강도 증가	불확실(모델 간 불일치)	- 생명과 건강 위험 증가 - 재산 및 사회 기반 시설 유실 증가 - 해안 생태계의 위험 증가

자료: IPCC, 2001.

2. 비가역적 기후변화

최근 많은 사람의 관심을 받기 시작한 복잡계 과학(complex system science)은 데카르트의 환원주의(reductionism)와 대척점에 있다고 볼 수 있다. 그 이유는 1 더하기 1이 2가 되지 않고, 전혀 새로운 특징이 불시에 출현(emergence)하기 때문이다. 이러한 출현이 발생하는 대표적인 복잡계의 예가 기후시스템인데 서로 다른 시공간 규모의 현상들이 상호 작용하면서 전체 기후의 특성을 이해하기 어렵게 한다(Solomon et al., 2009). 이러한 출현이 기후시스템에서 일어난 대표적 예가 약 1만 년 전 일어난 아프리카 서북부 지역의 녹지가 현재의 사하라 사막으로 바뀐 사건이라고 할 수 있다. 이 사건은 태양 변동성과 해수면 온도 변화, 그리고 생태계-대기 상호작용의 복합 결과로 일어났으며 지면의 극적인 변화로 인해 상당한 연구가 진행되어온 급격한 변화의 예이다(Claussen et al., 1999; Wang and Eltahir, 2000; Groner et al., 2018).

미래 기후에서 세계의 다양한 지역에서 이러한 급격한 변화가 일어나거나 아니면 대기 중 이산화탄소 농도를 산업혁명 이전으로 돌려놓았을 때 지구의 기후가 과거로 돌아가지 않을 가능성이 최근 연구에서 제시되고 있는데, 가장 큰 문제는 현재 지구시스템 모델이 이러한 급격한 기후변화 또는 비가역적 변화를 진단하거나 예측하는 데 어려움을 가지고 있다는 점이다. 자연 변동성과 생태계 교란 등이 적절하게 모델에 반영되어야 하는데, 최근 들어 인간의 화석 연료 배출뿐만 아니라 도시화에 따른 피복 변화를 포함하는 각종 인간 활동을 지구시스템에 반영하려는 노력이 시도되고 있는 것도 이러한 다양한 상호작용을 보다 현실적으로 반영하려는 노력의 하나로 볼 수 있다.

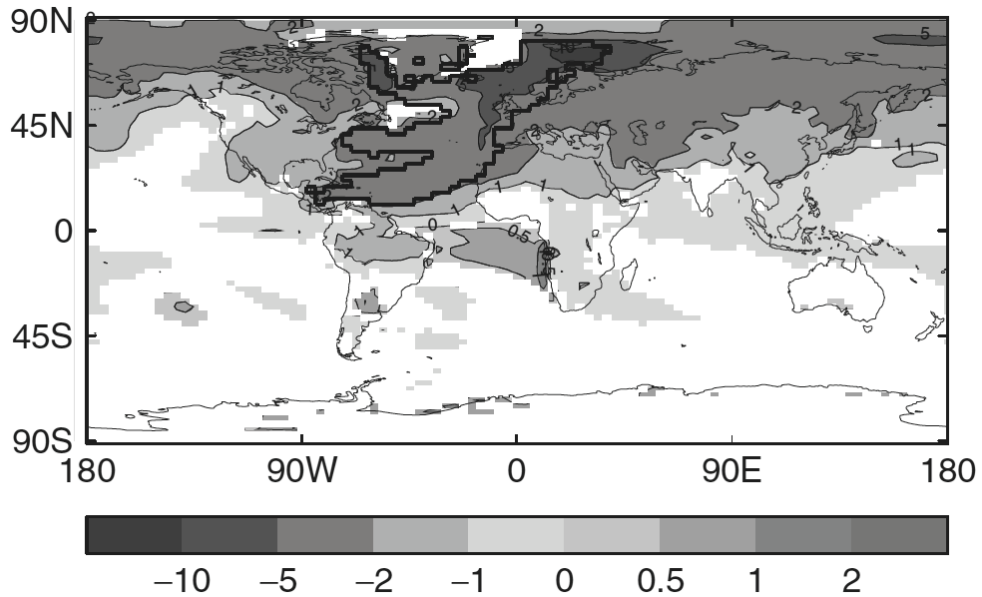
우리나라에 직간접적으로 영향을 줄 수 있는 주변 지역 생태계의 급격한 변화 발생 가능성을 감시하고, 예측력을 향상시키기 위하여 전체 지구시스템 모델을 개발, 검증, 운영할 수 있는 전문 인력이 필요한데, 이 분야에서 앞서가고 있는 독일의 막스 플랑크 연구소의 사례는 우리에게 큰 교훈을 준다. 막스 플랑크 연구소는 철저하게 기초과학 분야의 연구에 집중하고 있으며, 당시 학문의 유행이나 필요성과 관계없이 다양한 분야의 학문을 지원하는 세계 최고 수준의



연구소이다. 이러한 기초과학 분야의 투자는 학문의 다양성을 풍부하게 하고 새로운 사회 환경과 자연환경이 우리에게 닥쳤을 때 헤쳐 나갈 수 있는 원동력과 지식을 제공하고 있다. 우리나라의 경우 한 분야의 과도한 몰입과 이로 인한 학문적 성과가 다시 한 분야로의 과도한 몰입을 일으키고 있다는 측면에서 학문의 다양성에 대한 새로운 접근이 필요한 것이 사실이다. 이는 알파고라는 인공지능의 출현 이전까지 대중적 인기와 당장 현재 필요성이 없다는 이유로 인공지능 분야에 전무했던 연구 투자가 갑자기 4차 산업혁명 깃발 아래 많은 연구 투자가 이루어지고 있지만, 정작 원천 기술은 부족하고 공개된 코드를 활용하는 수준에 머무르고 있는 학문적 현실과 맞닿아 있다고 할 수 있다.

이와 함께 정책 결정 과정에서는, 이러한 급격하고 비가역적인 변화를 예측하는 현재 기후 모델이 가지고 있는 불확실성이 크며, 특히 지역 규모 및 국지 규모에서는 불확실성이 더욱 크다는 점들을 반영하는 것이 필요하다. 또한 지구시스템의 구성요소 간의 복잡한 비선형 상호 작용으로 대서양 자오 순환 역전과 사막화와 같은 급격한 변화의 도화선이 될 가능성을 증가시킬 것이다. 그리고 강하고 빠른 교란이 지구시스템에 일어나면 일어날수록 이러한 급격한 변화의 발생 가능성도 커진다는 것을 이해하는 것도 필요하다. 이러한 급격한 변화는 지금까지 구축된 사회 안전망과 재난 대비책이 무용지물이 될 가능성을 의미하며, 그러한 대표적인 예가 2011년 도호쿠 대지진으로 인한 후쿠시마 원자력 발전소 사고이다. 영화 설국열차의 배경이 되는 대서양의 자오 순환 역전 현상이 실제 일어날 경우 10년 안에 북반부 지표면 기온을 2도에서 10도가량 하강시켜 지구온난화를 상쇄시키는 좋은 점도 있지만, 해수면 또한 크게 상승시켜 농업과 어업 및 해양 생태계에 재앙과 같은 변화를 일으킬 수 있다(Vellinga and Wood, 2008; McNeall et al., 2011) (<그림 2.3> 참조). 이러한 급격한 기후변화가 우리나라에서 직접 발생하거나 우리나라에 직간접적으로 영향을 줄 수 있는 지역에서 발생할지는 대형 재난의 발생뿐만 아니라 식량 및 물 안보 차원에서 매우 중요한 문제로서, 관련된 이론 및 모델을 개발 활용하는 연구와 이를 탐지할 수 있는 관측기술 개발이 향후 이루어지는 것이 필요하다.

〈그림 2.3〉 지구온난화 시나리오에서 대서양 자오 순환 역전 후 10년간 지면 기온의 변화



주: IPCC 1992 지구온난화 시나리오에서 대서양 자오 순환 역전이 발생하고 처음 10년간 지면 기온의 변화. 붉은색은 기온이 상승한 지역을 나타내며, 푸른색은 기온이 감소한 지역을 나타냄

자료: McNeall et al., 2011.



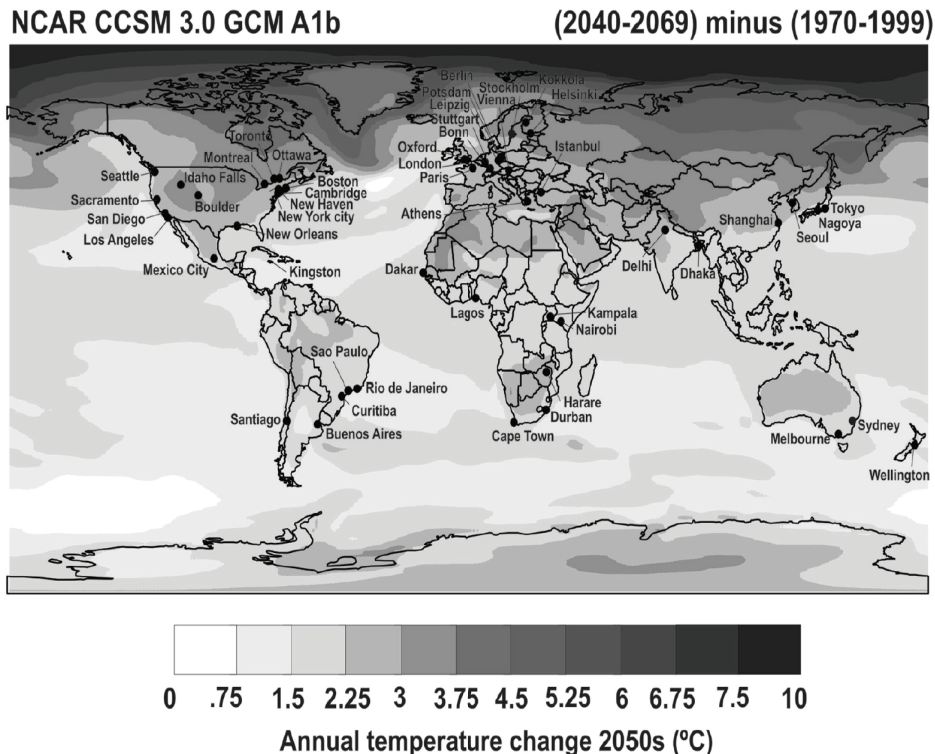
3. 도시 기후

2018년 현재 전 세계의 절반 이상이 도시에 거주하고 있으며, 전 세계적으로 일주일에 100만 명 정도의 인구가 도시로 유입되고 있다. 우리나라의 도시화는 더욱 진전되어 시군구 기준으로 90% 이상의 국민이 도시지역에 거주하고 있다. 도시의 기상 현상은 도시에서의 인간의 활동에 의한 효과가 중첩되어 나타나기 때문에 도시 이외의 지역과는 확연하게 구분된다. 가장 대표적인 도시에서의 기상 현상은 도시 열섬 현상으로, 도시에서 배출되는 인공 열과 건물과 같은 인공 구조물로 인하여 도시 주변 지역보다 기온이 높은 현상을 말한다. 도시 열섬 현상은 도시 기온의 상승이 지구온난화 및 폭염과 어떻게 상호작용하는지의 관점에서 매우 중요하다. 이와 함께 도시 열섬 현상이 주변 강수량 변화, 대기 화학 반응 촉진, 생태계와의 상호 작용, 미세먼지 농도 변화에 미치는 영향에 대해서도 연구가 이루어져야 한다. 우리나라의 경우 대규모 도시 개발이 도시 열섬을 강화한다는 연구 결과가 직접관측 자료 분석에 기반을 두어 수행된 적이 있으나, 도시 열섬을 제외한 다른 자연재해와 도시 구조 및 기능의 상호 작용에 관한 연구는 제한적인 것이 사실이다. 이와 함께 도시에서의 미세먼지 문제와 삶의 질을 향상시키는 다양한 정책과의 관계는 도시의 지속가능성을 위해 연구되어야 할 대상이다.

최근 연구 결과에 따르면 대부분 도시의 평균 온도가 전구 평균보다 크게 상승하고, 지난 과거에는 겪어보지 못한 더 길고 강한 폭염과 가뭄이 더 자주 발생할 것이라고 예상하고 있다(〈그림 2.4〉 참조). 또한, 강수 강도의 증가에 따라 보다 많은 홍수가 일어날 것으로 보인다(Rosenzweig et al., 2008). 도시는 인구 밀도가 높고, 밀집되고 높은 건물 구조 등으로 인하여 급격한 기후변화로 인한 메가 홍수, 가뭄, 강풍, 및 폭염 등의 위험기상에 매우 취약한 구조를 가질 수밖에 없다(‘IV. 기후변화와 보건’ 참조). 그리고 대부분 도시가 해안가나 강의 연안에 위치하기 때문에 해수면 상승, 폭풍, 해일, 폭우 및 하천 범람의 피해가 더 자주 일어나고 그 피해가 클 수밖에 없다. 앞서 언급한 것처럼 급격한 기후변화에 따른 극한 기상 현상은 앞으로 더 많은 빈도로 일어날 가능성이 크며, 도시 열섬 현상, 대기 오염과 함께 발생하면 에너지 생산 및 공급, 위생 시설, 배수시설, 교통, 통신과 같은 도시 공공기반 시설과 건강 관리 및 응급 의료 체계 서비스, 그리고

수자원 공급과 같은 생태계 서비스에 막대한 영향을 미치게 된다(〈그림 2.5〉 참조). 이는 결국 개인의 건강, 자산과 복지를 후퇴시키게 될 뿐만 아니라 전체 국가의 존립을 위협할 수 있으므로 대비가 필요하다(Tapsell et al., 2002). 이러한 극한 현상이 발생하더라도 사람들의 거주 형태나 도시화, 그리고 사회경제적 조건에 따라 인명 및 재산 피해에 대한 노출(exposure)과 취약성이 달라질 수 있음을 정책 과정에서 인지하고, 현재 우리나라의 대도시들에서 진행되거나 진행될 재개발은 반드시 이러한 점들을 고려해야 미래의 극한 기후나 급격한 환경 변화에서 피해를 최소화 할 수 있도록 잘 대처해야 할 것이다(IPCC, 2012).

〈그림 2.4〉 1980년과 2050년의 기온 차이



주: 기온이 하강한 지역은 없으며, 북극의 경우 현재 평균 기온보다 10도 정도 기온 상승함

자료: Rosenzweig et al., 2008.



〈그림 2.5〉 도시 기후변화 취약성 및 위험 평가 체계



자료: Mehrotra et al., 2009.

4. 태양 변동성과 재난

최근 들어 우주 기상 및 태양 활동에 관한 문제가 또 다른 형태의 재난으로 언급되고 있다. 현재 우리가 사용하는 많은 전자 장비들과 GPS 시스템에 기반을 둔 내비게이션들은 이제 우리 생활에 필수품이 되었다. 하지만 지구의 자기장이 약해지거나 태양 활동이 강해지는 시기에는 이러한 최첨단 장비 사용이 불가능해져, 통신 및 전력 시설 파괴와 같은 재난이 발생할 수 있다. 실제로 1989년 태양 폭풍으로 인하여 캐나다에서는 전기 공급이 9시간가량 중단되었다. 이러한 지구 자기장의 변동은 지구 역사 속에서 빈번히 일어났으며 가장 빠르게는 약 200년이라는 짧은 기간에도 자기장의 역전이 있음이 보고되었다(Chou et al., 2018). 이와 함께 태양의 활동은 기후 예측모델의 불확실성과 직결된다. 기후 예측에 사용되는 모델은 보통 지구라는 시스템을 구성하는 다양한 컴포넌트(대기-지면-해양)로 구성되어 있다(IPCC 5차 평가보고서 9장 참조). 컴포넌트 모델 간의 상호작용하는 방식도 문제가 될 수 있겠지만, 각 컴포넌트 모델이 자연 현상을 표현하는데 사용하는 수학적 표현의 불확실성은 기후 예측 불확실성의 직접적인 요인이다. 기후 예측의 핵심적인 부분을 차지하는 대기 모델의 경우, 현재까지 IPCC 기후 예측에 참여하는 모델은 기후시스템의 에너지원인 태양으로부터의 효과는 상대적으로 매우 간단하게 다루어 왔다. 그에 따라 태양 활동에 직접 영향을 받는 고층대기(중간권 및 열권)와 인간 활동이 이루어지는 대류권과의 연계에 관한 연구도 소홀히 다루어져 왔다. 실제로 많은 대기 모델의 상층 경계는 중간권을 포함하지 않을 정도로 낮다. 최근 진행되는 IPCC는 6차 평가보고서를 위한 작업에 참여하는 모델에 태양 변동성의 효과를 포함하도록 권고하고 있다. 이러한 노력은 2000년 초반 이후부터 NASA 위성 SORCE(Solar Radiation and Climate Experiment)를 통해 관측된 태양복사 변동성이 기존의 모델에서 사용하던 방식과 상당히 다르다는 인식에서부터 시작되었다. 이와 관련하여 미항공우주국에서는 TSIS(Total and Spectral Solar Irradiance Sensor) 1차 및 2차 센서를 발사하여 국제우주정거장에서 장기간에 걸친 태양복사의 변동성에 대한 상세 관측을 수행하고 있다. 2018년 8월 미국에서 태양 및 태양권 탐사를 위해 발사한 파커 위성은 태양의 중요성을 강조하는 좋은 예이다.



최근 연구들은 태양 변동성 및 이를 통한 고층대기-대류권 상호작용이 엘니뇨 남방진동, 이산화탄소 증가와 유사한 형태의 기후 변동성을 만들어낼 수 있다는 결과를 보고하고 있다(Ineson et al. 2011; Kidston et al. 2015). 태양 변동성의 효과를 모델에서 적절히 모의하기 위해서는 현실적인 태양 변동성을 반영할 수 있는 자외선 영역 태양복사 정보가 필요하며, 이렇게 개선된 자외선 복사에 적절히 반응할 수 있는 오존 관련 화학 반응 계산 모듈의 개선이 필요하다. 오존의 발생 및 소멸을 다루는 화학적 과정에는 다양한 기체상 화학물질이 관여하는데, 이러한 화학물질의 생성 및 소멸에 큰 영향을 주는 우주로부터 들어오는 입자의 문제 또한 대부분의 기후 예측모델에서 소홀히 다루어지고 있다. 우주로부터 들어오는 양성자나 전자들은 대기와 충돌하면서 대기를 이온화시키고 이온화된 화학물질은 기존의 대기 구성 분자와 상호작용하면서 오존 파괴물질인 NO_x를 생성시키는 것으로 잘 알려져 있다. 우주로부터 지구 대기로 들어오는 입자의 양이나 종류는 태양 변동성에 따라 달라지므로, 태양 변동성의 효과를 종합적으로 고려하기 위해서는 태양 변동성을 통한 복사 에너지의 변동뿐만 아니라 우주 기원 입자를 통한 화학 반응 변화에 관한 연구도 필요하다. 성층권 상부에서 생성된 오존이나 고층대기에서 생성된 오존 파괴물질은 성층권-중간권에 존재하는 전 지구 대규모 대기 순환을 통해 전 지구적으로 수송된다. 북반구 겨울철에서는 대략 2년에 한 번씩 성층권 돌연 승온 현상이 발생하는데, 이 돌연 승온 시 열대 지역 성층권 상부에서 생성된 오존이 북반구 고위도까지 수송된다. 또한, 중간권계면이나 하부 열권에서 우주 기원 입자에 의해 생성된 오존 파괴물질은 여름 반구 극에서 겨울 반구 극으로의 흐름을 타고 겨울 반구 고위도 지역으로 수송된다. 이와 같은 오존 혹은 오존 파괴물질의 수송이 대기의 행성 규모 파동(planetary waves) 및 중규모 중력파(gravity waves)의 운동량 강제력을 통해 일어나는 것은 이미 잘 알려져 있다. 고층대기를 포함하는 기후 예측모델에서 행성파 및 중력파 표현의 신뢰도를 평가하고 개선하는 과정 또한 기후 예측의 정확도를 높이기 위한 중요한 과정으로 볼 수 있다. 태양 활동 및 고층대기의 기후 예측에의 영향에 관한 연구는 WCRP(World Climate Research Programme) 산하 SPARC(Stratosphere-troposphere Processes and their Roles in Climate) 프로젝트의 다양한 하위

프로젝트를 통해서도 이미 오래전부터 진행되고 있으나, 아직까지 모든 기후 예측모델에서 이러한 영향을 종합적으로 다루고 있지는 못하고 있는 실정이다(<https://www.sparc-climate.org/>). 이러한 영향을 고려하기 위해서 초고층을 포함한 전체 대기 모형의 개발과 위성 자료의 활용 기반의 연구가 수행되어야 하며, 국가 우주 기본 개발 계획에 이를 반영하는 것도 필요할 것이다.



III

도시 개발과 기후변화



III

도시 개발과 기후변화

Policy proposals for multidisciplinary research for health and disaster response in a changing climate

도시의 구조는 대기의 흐름과 난류 특성 및 미기후(microclimate)에 영향을 주기 때문에 도시와 그 주변의 대기 오염물의 확산 및 수송을 조절하게 된다(Baklanov et al., 2007; Cleugh and Grimmond, 2012). 이 중에서도 가장 큰 영향을 주는 요소는 건물의 공간 분포, 도로와 건물 면적 등에 의한 도시 협곡 구조의 특성, 건물과 도로를 구성하는 불투수성(impervious) 재료와 이론 인한 식생 면적의 감소, 도시 내의 자동차와 나무에 의한 대기 오염물의 배출 및 화학 반응, 그리고 교통 및 냉난방과 같은 인간의 활동으로 배출되는 인공 열이라고 할 수 있다. 이에 따라 도시의 기온 상승률은 전국 평균보다 클 수밖에 없다. 따라서 도시를 개발하거나 기존 건물들을 재건축하는 도시 재개발은 다양한 도시 기후 및 환경 변화를 유발할 수밖에 없는 것이다. 즉 도시의 개발 및 재개발 과정은 도시의 구조 및 기능을 변경시키기 때문에 도시 기후 및 주변 지역의 환경과 에너지 사용에 큰 영향을 미치게 된다(Hong and Kim, 2015; Hong and Hong, 2016). 우리나라는 세계에서 유래를 찾기 어려울 정도로 1970년대 이후 산업화 과정과 함께 급속한 도시화가 진행되었다. 그동안의 도시 개발 과정에서는 도시 빈민들의 문제, 주택 문제가 주된 사회적 이슈였지만, 다가오는 미래에는 재난으로부터 안전하고 쾌적한 보건 환경을 갖춘 도시를 만드는 것이 매우 중요한 사회적 가치가 될 것이다.

우리나라 도시화는 경제 성장과 함께 1970년대에는 재개발로 2~5층 높이의 건물이 지어졌고, 1980년대에는 20층 정도의 아파트 단지가 지어졌다. 우리나라 아파트의 상당수가 1980년대 지어진 건물들로 이들 아파트가 노후화됨에 따라 다시 재개발하려는 시도들이 이루어져 왔는데, 1990년대 이후 재개발은 더 높은 고층 아파트의 등장과 함께 녹지를 더 많이 확보하려고 하고 있다. 지금 서울 독립문 부근의 항공사진을 보면 이런 서울의 개발 변천사가 뚜렷하게 보인다. 나무가 미치는 환경적 요인을 고려하지 않은 채 녹지 공간의 단순한 양적 확보가



부동산 가치를 올리고 주변 환경을 살기 좋게 할 것이라는 과도한 믿음도 과학적 사실에 기반을 둔 연구로 뒷받침되거나 보완 장치가 마련되어야 한다. 시카고 폭염 이후, 도심 주변 나무와 숲을 일일이 조사하고 그 기후 및 환경에 미치는 영향을 모델링과 함께 접목하여 작성된 보고서는 시사하는 바가 매우 크다.

앞서 언급한 것처럼 우리가 사는 21세기는 그동안 인류가 겪어보지 못한 다양한 상황을 겪게 될 것이다. 인공지능의 발전으로 대표되는 새로운 기술도 그렇지만, 환경적 측면에서는 지구온난화와 폭염 및 가뭄의 발생과 생물의 멸종이 빠르게 일어나고 있다. IPCC 보고서에 따르면 100여 년 만의 폭염이라는 2018년 여름 더위는 지구온난화에 따라 앞으로 더 자주 더 강한 강도로 발생할 것이다. 우리 사회의 급격한 도시화 현상과 재개발은 급격한 기후변화와 함께 맞물려 지금까지 우리가 겪어보지 못한 많은 문제와 대비책을 요구한다. 예를 들어 폭염 발생의 경우에 전력 소비량은 급격하게 증가하고 태양광 에너지 발전 효율은 떨어지게 되는데, 에너지 수급 정책에서 이런 점들을 충분히 고려하지 않으면 블랙아웃이 현실화할 수 있다(Hong and Kim, 2015; Lee and Hong, 2015). 따라서 이런 재난에 대비하는 도시 차원의 유기적이고 장기적인 대비가 필요한 때라고 할 수 있다. 우리가 재개발한 도시가 이러한 재해에 적절히 대비하지 않는다면 수많은 인명 및 재산 피해를 발생시킬 수밖에 없을 것이다. 무엇보다도, 수많은 인구가 좁은 도시 지역에 사는 만큼 도시의 개발이 이런 재해를 포함한 다양한 상황을 견딜 수 있도록 도시의 특성에 맞는 준비가 되어있어야 할 것이다.

미국의 뉴욕시는 정기적으로 기후변화의 영향을 평가하고 뉴욕이라는 도시에 적합한 적응 정책을 마련하기 위해서 기후변화에 관한 뉴욕 협의체(New York Panel on Climate Change: NPCC)를 만들고 2008년부터 정기적으로 보고서를 발간하고 있다(NPCC, 2017). 또한, 영국 런던은 2011년 런던의 기후변화 적응 정책을 소개하는 보고서를 발간하였으며(Nickson et al. 2011), 파리, 더반, 리우데자네이루는 도시 기후변화 연구 네트워크(Urban Climate Change Research Network: UCCRN)에 가입하여 기후와 관련된 재난을 다루기 위해 노력하고 있다(UCCRN, 2017). 세계 기상 기구(World Meteorological Organization: WMO)도 도시 기후 문제의 중요성과 집중적인 연구의 필요성을

언급하고 있다(WMC-17, 2015). 2016년 10월 주거와 지속가능한 도시 개발에 관한 UN 회의에서 채택된 새로운 UN의 Urban Agenda는 도시의 회복 탄력성, 기후 및 환경의 지속 가능성과 재난 리스크 관리를 향후 20년 동안의 도시의 지속가능한 개발의 주요 이슈로 제시하였다(Habitat-III, 2016). 세계기상기구(World Meteorological Organization: WMO)는 2015년 17차 총회에서 WWRP (World Weather Research Programme)의 HIW(High Impact Weather Project)를 출범시키며 사회에 큰 영향을 미치는 대기 현상에 대한 회복력을 크게 증가시키기 위해서 국제 공동 연구를 장려하고 있다(Jones and Golding, 2014). 2015년 세계기상기구 총회에서는 도시의 날씨, 환경 및 기후 서비스를 통합하는 것이 필요함을 강조하였다.

지난 20세기 근대 산업화 시대에는 겉으로 보이는 건물들과 그로 인한 부동산 상승이 우리가 도시를 개발하는 중요한 이유였다고 한다면 우리가 살고 있고, 살아가야 할 21세기에는 급격한 환경 변화와 자연재해에 대비하여 우리가 사는 도시는 어떤 모습을 가져야 하는지 고민이 필요한 시기이며, 현재 활발하게 진행되고 있는 도시 재개발 논의 과정에서 반드시 도시 기후 및 환경적 측면을 고려하는 제도적 장치가 마련되어야 할 것이다. 도시 재개발을 진행할 때 지진이나 홍수에 안전한지, 미세먼지는 적고, 온실가스 배출은 적은지, 에너지를 적게 사용할 것인지를, 신재생 에너지는 도시 환경에 나쁜 악영향을 끼치지 않는지 등에 대한 제도적 접근이 필요한 것이다.

우리의 빠른 도시화 과정이 과거 정책 마련에 어려운 점이었다면, 우리 사회 곳곳에서 일어나고 있는 재개발과 스마트 시티에 대한 최근의 관심은 오히려 기후변화에 대비한 완화 및 적응 정책을 실현할 수 있는 매우 좋은 기회라고 볼 수 있다.

특히 대부분 도시는 인구 밀도가 높아 극한 기상이나 자연재해에 매우 취약하며 이에 따라 세계기상기구는 사회경제적, 환경적 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 연구 주제에 대해 언급하였다(Jones and Golding, 2014).

1. 위험을 일으키는 기상 현상 과정의 이해와 예측
2. 수치 예보 모델, 해양 모델, 육상 모델, 얼음, 대기질 모델링, 자료 동화와 사후



자료 처리 시스템을 통합하여 다양한 규모의 위험 예측

3. 사람, 건물, 사업, 사회 기반 시설 및 환경에 미치는 인간의 영향, 노출 정도, 취약성, 그리고 위험 요소들의 예측을 위한 다양한 연구 도구
4. 지역 사회의 회복력을 증가시키는 취약 지역 사회 계층에게 접근할 수 있고 일반 대중과 위험 관리사들로부터의 반응을 얻어내기 위하여 위험 예측과 경보의 전달
5. 위험 기상 현상의 영향 및 위험 예측, 경보와 이에 따른 결과를 사용자에게 적합한 측정 지수로 평가

이에 따라 도시 기상, 환경, 기후 서비스를 통합하여 제공하는 것이 제안되고 개발되기 시작했다. 이러한 통합 서비스는 도시에서의 높은 인구 밀도와 사회에 미치는 영향력, 관련 법체계의 필요성과 과학 기술적 도움을 받는 데 필요한데, 이를 위한 과학기술 개발 분야는 다음과 같이 제시되었다(Grimmond et al., 2014; Baklanov et al., 2018).

- 도시 환경에서의 통합 서비스 필요 조건과 복잡한 환경에서 관측 자료 위치 식별을 만족하는 향상된 관측 수요에 관한 이해와 지식
- 이음새 없는 서비스를 위한 개념, 과학적 역량 및 기술
- 사회로의 서비스 응용의 제공을 위해 필요한 과학기술
- 지능적이고 현명한 도시를 만들기 위한 새로운 기술의 응용을 포함하는 스마트 전달 방식
- 빅데이터를 효과적으로 사용하는 방법
- 생산품과 서비스의 혜택과 품질을 평가하는 데 필요한 사용자에게 적절한 접근 방법의 이행

토론토, 베이징, 도쿄에서 관련 연구가 진행되었고, 우리나라에서도 기상청 주도로 진행되었으나 다양한 문제와 요인에 의해 현재 사업이 종료되었다. 관련 연구에 대한 필요성을 검토하고 일반 시민의 참여 방안과 우리나라의 상황에 맞는

접근 방법을 검토하여 재추진할 수 있는 연구 기관이 현시점 필요하다. 특히 관측 분야의 이해 및 관측을 수행하고 관측자료의 불확실성을 정량화할 수 있는 전문가는 우리나라에 전무한 실정이다. 이러한 상황에서 도시 방재와 지속가능성을 위한 최고의 방법은 무엇인지 보다 올바른 논의가 우선되어야 할 것이다.

〈그림 3.1〉 기후변화 영향 평가에 있어 주요 인자의 불확실성의 크기



자료: Schneider, 2003.

도시에서의 다양한 위험을 줄이기 위해서는 국지 환경의 지식과 정보가 매우 중요함이 지적됐지만, 현재 과학 예측력의 불확실성이 전구 규모에서 지역 규모 및 국지 규모로 다운 스케일링 될수록, 또한 영향을 평가하는 단계에 접어들수록 폭발적으로 증가함을 정책 과정에서 이해하는 것도 중요하다(Steinberg, 2016) (〈그림 3.1〉 참조). 따라서 과학 기술적으로는 재난과 관련한 단순한 다운 스케일링과 기후 자료 생산 및 기상 관련 연구는 정부 현업기관에서 계속 유지하고, 향후 그 영향력이 커질 수 있는 대기 과학의 기초 분야 연구는 대학 또는 민간 연구소와의 협업을 효과적으로 수행할 수 있으며 정책과 연계할 수



있는 유연한 분위기의 연구 조직에서 수행하는 것이 필요하다고 볼 수 있다. 연구 주제로는 초고층을 포함하는 장기간의 도시 관측 기반의 연구가 시도되어야 하며, 중규모 이하의 모형과 도시 군락 모형, 그리고 전산 유체모형을 개발하고 우리나라의 도시에 맞도록 개조하는 연구가 시행되어야 한다. 이와 더불어 태양광 사업과 같은 신재생 에너지의 도시 지역 적용과 아파트 재건축과 같은 대규모 도시 개발 및 변화 사업은 도시와 그 주변의 기후 및 환경 영향 평가가 반드시 수행되어야 차후에 발생할 복합 재난의 피해를 줄일 수 있을 것이다. 최근 시도되고 있는 스마트 시티 사업에서도 도시 기후 전문가의 역할 참여와 기후 및 환경 변화에 적절하게 대응할 수 있으며 온실가스 배출과 흡수 과정을 점검하여 최적화함으로써 지속가능한 도시 (재)개발이 이루어질 수 있는 과학적 제도적 장치가 시급하게 마련되어야 할 것이다.

최근 다양한 외부 충격에 지속가능한 도시를 위한 개발을 위해 압축 도시(Compact city)와 스마트 시티(smart city)가 제안되었다. 스마트 시티는 도시 과밀화에 따른 각종 비용 급증과 환경오염을 줄이고 도시기능을 최적화하는 대안으로 제시되었다. 미래학자들이 새로운 도시 유형으로 예측하였으며, 도시 인프라의 계획, 설계, 구축, 운영 등에 사물인터넷과 같은 최첨단 기술을 적용해 삶의 질과 부의 창조를 만드는 도시에 초점을 맞추고 있다. 최근 대통령직속 4차산업혁명위원회 산하에 스마트시티 특별위원회가 만들어져 관련 내용을 지원하고 있다. 압축 도시는 1970년대 미국 MIT 학자들이 제창한 가상 도시로 도심 공동화 현상과 같은 20세기 도시계획의 실패에 대한 반성에서 출발하였다. 기존의 도시 개발이 자동차를 중심으로 도시를 확장시키는 도시 스프롤 현상(urban sprawl: 도시 개발이 근접 미개발 지역으로 확산되는 현상) 기반의 도시였다면 압축 도시는 도시를 압축하여 고밀도의 복합토지이용 및 분산된 집중 개념에 기반을 두고 있다(<그림 3.2> 참조).

압축 도시는 자동차 이용 감소와 출퇴근 시간 감소, 기존 도심의 재활성화와 녹지 공간 확보의 용이성을 통하여 에너지 소비 및 온실가스 배출량을 줄이고 오염물질 배출을 감소시키는 효과가 있다. 압축 도시를 위해서는 이와 함께 자연재해가 최소화될 수 있는 장소의 선정과 이에 대비한 준비가 필요하다.

스마트 시티는 사물인터넷과 전력 그리드 망을 통한 에너지 소비의 효율성을 강조하며, 압축 도시도 그 고밀도 특성을 통한 다양한 에너지 사용의 효율성을 강조하는 공통점이 있지만, 현재는 앞서 언급된 급격한 기후변화와 복합 재난에 대비한 연구 개발 투자가 부족한 것도 사실이다. 특히 하나의 재난에 대비한 정책은 복합 재난과 급한 기상 현상이 발생할 때 큰 효과를 발휘하지 못하거나 오히려 더 나쁜 영향을 만들 수 있다는 점에서 최근 기후변화 양상을 주목하고, 각각의 개별 정책이 복합 재난이 발생했을 때 어떤 효과를 가져올지 면밀한 과학 연구가 필요하다. 예를 들어, 최근 우리나라에서 폭염을 방지하기 위한 목적으로 도시 숲의 조성을 강조하고 있으나, 실제 기온 감소가 있다고 해도, 이러한 기온 감소와 숲에서 배출되는 유기 화합물이 대기 오염과 미세먼지를 악화시킬 가능성에 대해서는 국내 기후 환경에서 적절한 과학적 연구가 진행된 적이 없다.

〈그림 3.2〉 도시의 형태



자료: 삼성지구환경연구소, 2009.



IV

기후변화와 보건



IV

기후변화와 보건

Policy proposals for multidisciplinary research for health and disaster response in a changing climate

위에서 언급한 극한 현상과 급격한 변화는 우리 사회에 큰 영향을 미칠 수 있다. 특히 인구 밀도가 높은 도시의 경우에는 폭우, 태풍, 해일과 같은 극한 현상이 발생했을 때 수많은 인명피해를 유발하게 된다. 그리고 앞서 언급한 것처럼 이러한 급격하고 과격한 현상이 미래에 발생할 확률이 증가하고 있으므로 도시 시스템을 이러한 현상에 적절하게 대비하지 않으면 피해는 기하급수적으로 증가할 것이다. 특히 도시에 거주하는 취약계층의 주민들은 물, 위생 시설, 전기, 의료 서비스 및 응급 지원 체계의 지원을 쉽게 받을 수 없으므로 이러한 재해에 매우 취약할 수밖에 없다. 또한, 도시에서는 물, 식량 및 에너지 공급 체계가 복잡하므로, 폐기물과 쓰레기 처리 시스템에 매우 민감할 수밖에 없다. 2018년 4월 발생한 페비닐, 플라스틱 수거 집단 거부 사태가 이러한 상황의 직접적인 예가 될 것이다. 따라서 자연재해가 발생하면 도시 내의 이러한 자원 순환 시스템의 붕괴로 인하여 도시 거주민들의 건강에 매우 심각한 영향을 미칠 수 있다(McBean and Henstra, 2003).

이와 함께 도시화가 급격하게 진행되고 도시가 팽창함에 따라 자연재해에 취약한 산악 지형이나 저지대로 확장된 도시지역은 지구온난화와 도시 열섬 현상의 증첩으로 인하여 극한 현상에 의한 피해에 취약할 수밖에 없다(〈그림 4.1〉 참조). 극한 현상으로 인한 건강 피해는 후진국이나 개도국뿐 아니라, 보건시스템이 잘 구축된 선진국에서도 흔히 발생하고 있다. 미국의 경우, 시카고에서 1995년 7월 발생한 폭염으로 인해 7월 한 달 동안 700명이 사망하였으며, 심장혈관질환 등 기저질환을 앓고 있는 사람, 고령자 등과 같이 사회적인 약자에서 폭염으로 인한 사망이 매우 높은 것으로 조사되었다(Semenza et al, 1996). 2000년대에 들어서도 2005년 미국 뉴올리언스에서 허리케인 카트리나에 의해 1,800명 이상이 사망한 사건이나 2003년 프랑스 파리에서만 폭염으로 인해 2,000여 명의 초과 사망자(평년 기온 대기 사망자수)가 발생한



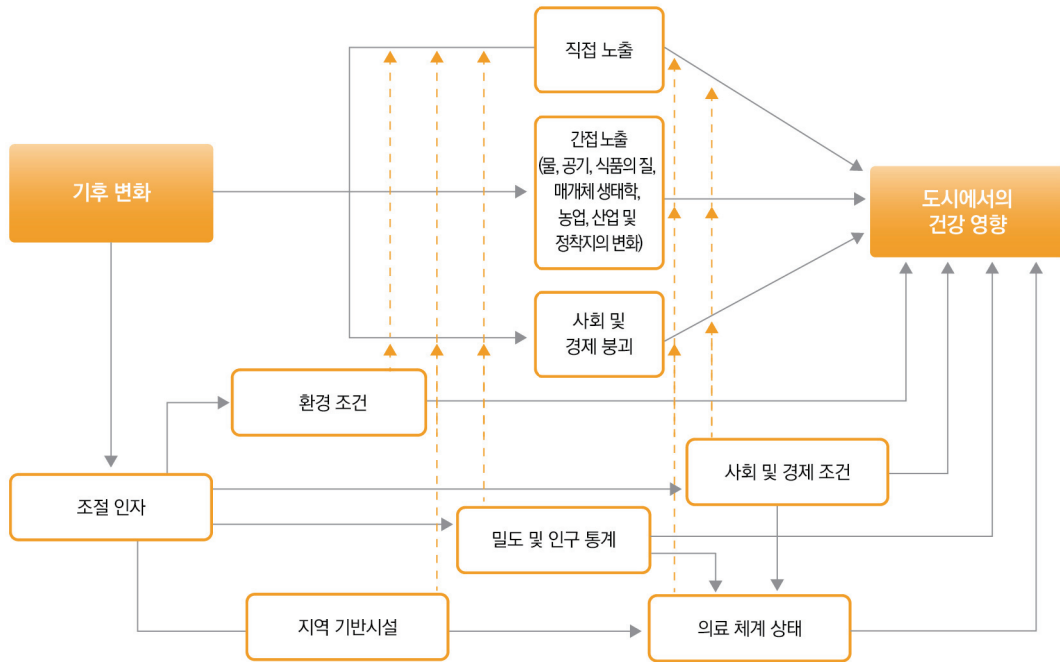
것으로 보고하고 있다. 이러한 사실은 인구 대부분이 도시에 집중된 우리나라에 시사하는 바가 매우 크다. 도시의 재난은 복합적인 자연재해의 발생이 일어났을 때 피해가 커질 수도 있지만 하나의 극한 현상에 의해서도 복합적인 재난이 발생할 수 있다는 측면에서 우리의 대비책이 필요하다고 볼 수 있다.

이처럼 기후변화에 따른 인류의 건강 위협 문제는 다양한 측면에서 발생하는데 요약하면 다음과 같다(Costello et al., 2009).

1. 강한 바람과 호우가 발생으로 인하여 나무나 간판의 훼손에 의한 직접적인 정신적 외상, 물리적 부상 및 사망 발생
2. 극한 현상으로 주거시설이나 정수 시설 및 식료품의 냉장 저장 시설의 파괴로 인해 생물학적 또는 화학적 노출의 증가로 인해 극한 현상 이후 관련 질환의 발생
3. 장마철과 같이 강수 기간이 길거나, 홍수가 발생하거나, 해수면 상승으로 인한 염류의 침투 등으로 인한 수인성 질병의 발생
4. 고온에 노출된 음식물에서의 박테리아 증가로 인한 음식 유래 감염병의 발생
5. 모기나 진드기 등에 의한 매개체 감염 질병의 광범위한 확산에 의한 질병 및 사망 발생
6. 기온 및 강수 패턴의 변화에 따른 대기 오염의 증가와 이로 인한 호흡기 질병의 발생
7. 폭염과 도시 열섬 효과에 따른 노약자들의 질병 및 초과 사망
8. 극한 현상 발생으로 인한 생필품의 부족 및 가격 급등으로 인한 영양 부족과 이로 인한 건강 악화
9. 기후변화에 따라 적절한 생필품 및 응급 지원 체계가 갖추어지지 않은 곳으로의 인구의 이동과 이로 인한 질병 발생 증가

최근 우리나라의 경우 대기오염물질 중에서 미세먼지에 관한 대중적인 관심이 매우 높지만, 오존 증가와 같이 다양한 대기 오염 문제가 발생할 수 있다. 기후변화와 대기 질에 관련된 주요 건강 위협 요인은 <표 4.1>과 같다(Berry et al., 2014; Berry and Richardson, 2016).

〈그림 4.1〉 기후변화와 대기 질에 관련된 주요 건강 위협 요인



주: 기후변화에 의한 건강 문제를 일으키는 세 가지 메커니즘과 관련 조절 인자들 자료: Adapted from Confalonieri et al., 2007.



〈표 4.1〉 기후변화와 대기 질과 관련된 주요 건강 위험 요인

대기 오염물	기후변화와 관련 유발 인자	건강 리스크
지상 오존	- 기온 상승	- 사망 - 호흡기 증후군 및 염증 - 면역 방어 체계 영향 - 심장병 영향 - 장기적인 호흡기 악영향
미세먼지, 초미세먼지	- 산불 - 가뭄 - 건물 보호를 위한 개조	- 사망 - 심장병 - 활동 일수 제한 - 호흡기 증후군 - 기관지염 - 천식 악화
공기 중 알레르겐	- 기온 상승	- 알레르기 반응 - 천식 및 만성 폐쇄성 폐 질환과 같은 호흡기 질병의 악화
곰팡이	- 강수 나 홍수의 건물 침투에 따른 습기 - 잘못 설계된 환기 및 에어컨 시스템 - 잘못된 건물 유지 관리	- 호흡기 질병 - 뇌막염이나 폐렴을 유발하는 효모균증
휘발성 유기 화합물	- 건물 내부의 습기	- 천식 - 알레르기
일산화탄소	- 기상 관련 사태 시 이동형 가스 및 전기 난로, 가스난로, 화로 및 촛불의 사용	- 화상과 그로 인한 사망 - 일산화탄소 중독

이렇게 기후변화 때문에 유도된 건강 문제는 도시의 하부구조에 의해서 더 증폭 되거나 약화하여 나타날 수 있는데, 우리의 건강에 영향을 주는 사회 기반 시설의 예를 들어보면 다음과 같다(Barate et al., 2011; Schmeltz et al. 2013).

1. 교통 체계: 도로, 철도, 항구, 보도, 공항 및 내비게이션
 - 식료품 및 의약품의 수송
 - 의료 서비스 및 응급 구호 서비스로의 접근
2. 물 공급 체계: 식수 공급과 관련된 저장소, 정수 처리 및 분배 체계, 하수도 및 배수 체계, 펌프와 같은 홍수 조절 시스템

- 깨끗한 식수 공급
- 홍수 조절
- 3. 쓰레기 처리 체계: 쓰레기 수거, 매립 및 소각 시스템, 독성 제거 시설
 - 유해 폐기물 처리
- 4. 에너지 체계: 전력 생산 및 분배, 변전소, 석유 및 천연가스 저장과 분배, 지역 난방 시스템
 - 냉난방, 요로, 냉장고, 전등 사용을 위한 에너지 공급
- 5. 통신 체계: 라디오 송수신, 휴대전화 네트워크, 전화, 텔레비전, 인터넷 네트워크, 응급 상황 전파 체계
 - 건강 정보 교환
 - 응급 상황 경고 및 관련 대처 상황 전파
 - 비상 통신 시스템
- 6. 의료 체계: 병원 및 보건소, 응급 치료 서비스, 백신이나 보건 교육과 같은 공공 의료 서비스
 - 질병 및 부상 치료
 - 비상 연락 체계
 - 질병의 사전 예방 기능
- 7. 녹지: 공원, 호수, 숲
 - 심터로의 역할
 - 자연 배수지 역할
- 8. 대기, 수문, 지질 관측 네트워크: 기상관측망, 조수 감시망, 유량 감시망
 - 재해 발생의 사전 경고 및 대처 방안의 확산

기후변화와 관련하여 도시에 자연재해가 발생하는 경우, 이러한 도시의 사회 기반 시설이 제대로 기능하지 못함으로써 다양한 종류의 보건 문제가 발생할 수 있으며, 관련된 질병과 도시에 미치는 효과는 <표4.2>와 같다. 이를 통해 우선순위가 필요한 연구 분야를 파악할 수 있다.



〈표 4.2〉 기후변화와 관련된 대기 상태 변화와 이로 인한 도시 거주자들의 건강 영향

유발 인자	건강	도시 전체에 미치는 효과	불확실 정도
극한 기온	열사병으로 인한 사망. 노약 층이 제일 취약	도시 열섬을 통한 증가	광범위한 증거들로 인한 낮은 불확실성
풍해, 폭풍, 홍수	물리적 트라우마에 의한 사망 및 익사	취약 지역의 높은 인구 밀도에 따른 증가	광범위한 증거들로 인한 낮은 불확실성
가뭄	영양실조	모호함	적응 능력에 대한 이해 부족으로 중간 정도의 불확실성
수질	설사병	오염물 제거 기능 부족으로 인한 증가	제한된 연구로 인한 높은 불확실성
대기질	호흡기 질병	인구 밀도와 오염물 소스에 따른 증가	제한된 연구와 도시마다 다른 결과로 인한 높은 불확실성
공기 중 알레르겐	알레르기, 천식	모호함	제한된 연구와 도시마다 다른 결과로 인한 높은 불확실성
매개체 질병	말라리아, 뎅기열 등	도시 환경에서 매개체의 부적응으로 인한 감소	높은 불확실성

자료: Barata et al., 2011.

국내외적으로 폭염, 대기 오염에 따른 초과사망자와 심혈관계 질환의 관련성을 파악하기 위한 다양한 연구가 진행되었으며, 최근 우리나라에서도 질환에 대한 정보를 담고 있는 빅데이터 공개와 함께 전문가 집단에 의한 관련 연구에 상당한 진척이 있었다. 하지만 여전히 앞서 언급된 극한 기후 현상과 급격한 기후변화가 발생했을 때 우리들의 건강에 미치는 영향에 대해서는 아직 연구해야 할 부분이 많다(Yardley, 2011; World Health Organization, 2011). 이러한 부분을 해결하고 대비하기 위한 목적으로 최근 극한 날씨 지역 사회 건강 모델에 관한 연구가 진행되어야 하며, 이와 함께 이런 문제의 해결을 위해서는 융합 연구의 중요성을 인식하고 이를 시민 사회 공동체와 공유하는 것이 전문가 집단의 신뢰 회복과 정책의 효과를 극대화할 수 있다. 그리고 세계적으로 시민 공동체의 참여와 이들이 사는 지역적, 문화적, 정치 사회적 특성을 이해함으로써 신뢰를 쌓는 다양한 방법이 진행되고 있음에도 주목할 필요가 있다(Steinberg and Steinberg, 2015).

현재 세계보건기구를 중심으로 기후변화에 대처하는 의료 복지 모델로 개발도상국과 저개발 국가에 보편적 의료 복지(universal health care)를 시행하기 위한 노력을 전개하고 있다. 우리나라는 이러한 보편적 의료 복지를 매우 빠르게 시작한 나라로서 상대적으로 기후변화에 취약한 계층을 보호할 수 있는 시스템이 일정 부분 갖추어져 있다. 하지만 앞서 언급한 극한 기상 및 기후변화와 여러 개의 재난이 동시다발적으로 발생하는 복합 재난에 대해 지속가능한 보건 체계를 만드는 문제에 대한 고민과 준비를 바로 시작해야 할 시점이다.

기후변화와 도시에 관한 첫 번째 평가보고서에서는 건강의 지속가능성을 위한 다양한 방법을 제시하고 있는데, 대표적인 예로서는 기술과 사회 네트워크를 이용한 건강 감시망과 조기 경보 시스템 구축, 도시 열섬을 줄이기 위한 다양한 방법의 적용, 극한 기상 발생 시에 가장 중요한 물과 에너지의 안정성 확보, 홍수 등에 의한 노출을 최소화하기 범람 위험 지역의 조절들이 있다. 그리고 다양한 연구결과에서 기후변화에 의한 건강의 영향을 최소화하기 위해 도시계획의 중요성을 언급하고 있는 것에 주목하여, 앞서 언급된 우리나라의 대규모 재개발 정책의 실행과 스마트 시티 개발에서 이러한 문제들을 종합적으로 고려할 필요가 있다. 이와 관련하여 IPCC 보고서(Confalonieri et al., 2007), 세계보건기구 보고서(WHO, 2009)와 Frumkin et al.(2008)에서 제시한 향후 주요 연구 방향과 주제를 다시 살펴보고 우리 사회의 보건 분야에 어떻게 적용할 것인지 검토하는 것은 의미가 있다고 볼 수 있다.

V

기후변화에 따른 재난의 경제성 평가



우리 사회는 자연에서 일어나는 극한 현상에 취약한데, 지구온난화와 도시화, 삼림 벌채, 대수층 고갈, 지하수 오염 및 관개수의 잘못된 사용과 같은 인간의 영향으로 대재앙 수준의 홍수와 가뭄의 빈도와 강도가 증가할 것이라고 조심스럽게 예측되고 있다(IPCC, 2014). IPCC 보고서에 따르면 1990년대의 날씨와 관련된 재해로부터의 손실은 1960년대보다 8배 더 높았다. 특히 태풍이나 허리케인과 같은 열대성 저기압의 발생 빈도가 지난 수십 년 동안 변하거나 남은 21세기 동안 변할 것이라는 명확하고 신뢰성 높은 증거는 없지만 많은 자료가 이러한 열대성 저기압으로 인한 피해가 천문학적으로 증가했다는 것을 알려주고 있다. 이러한 막대한 경제적 피해의 증가가 사회경제적 측면에 의한 것인지, 아니면 극한 기상 현상의 발생 빈도와 강도의 증가 때문인지 논란의 여지가 있지만 지난 과거에 관측된 극한 현상의 손해 사정을 통해서 기후 변동에 의한 재난을 방지하는 데 필요한 사회적 비용을 평가할 수 있을 것이다.

일반적으로 기후변화의 효과의 비용 편익은 조사방법에 따라 큰 차이를 보이게 되는데, 이에 따라 정책 결정자는 전혀 다른 결정을 할 수 있다. 특히 기후 피해 기후변화에 따른 피해 산정은 경제학자와 자연 과학자 사이에 큰 차이를 보이는데, 예를 들어 무형의 서비스나 피해의 편익 비용 산정을 위해 흔히 사용되는 방법이 가상평가법(Contingent valuation method: CVM)에서는 설문 조사에 의지하기 때문에 가치 평가에 있어 큰 차이를 보일 가능성이 매우 크다. 이에 따라 단순히 시장 경제와 비시장 경제로 나누지 않고, 재정적 손실, 인명피해, 삶의 질(ex. 문화적 다양성, 문화유산 피해, 자원의 독점), 종 다양성 및 자원 및 자본의 분배의 불평등의 5가지 측면에서 이해되어야 한다(Schneider et al., 2000). 하지만 기후변화의 편익을 산정하는데 사용하는 방법에서 고려한 서비스들과 고려하지 않은 것들을 명확하게 해야 하며, 최종 편익 비용 산정을 위해 개별 비용을 합치는 단계에서 추적이 가능하도록 명확한 정보를 제공해야 한다.



이와 함께 편익 비용을 위해 사용되는 대표 에이전트 모델(representative agent model)이나 중첩 세대 모형(overlapping generations model)에서 세대 간 차이를 다루는 방식에 따라 기후변화의 변화하는 특징을 제대로 반영하지 못할 수 있다. 이와 함께 현재와 미래의 가치를 연계하는 할인율(discounting)에 딸 큰 차이를 보일 수 있음을 이해하고, 할인율 산정에 매우 주의해야 한다. 일반적으로 할인율이 0이면 현재와 미래의 가치가 같음을 의미하고, 무한대이면 오직 현재의 비용만 중요해지기 때문이다(Arrow et al., 1996). 극한 기후 현상이나 되돌릴 수 없는 급격한 변화에 대비하는 투자에 있어, 이러한 문제를 보다 명확하게 정량화하고 통합 평가 모델에서 사용되는 가정들이 적용될 수 없으므로 이를 해결할 수 있는 다양한 노력이 수행되어야 할 것이다. 특히 극한 돌이킬 수 없는 급격한 변화는 우리 세대를 뛰어넘는 시간 규모로 일어날 수 있으므로 기존 분석 방법을 벗어날 것이며 따라서 이러한 편익 비용을 어떻게 산정하고 일반 시민 사회와 소통할지 중요한 문제이다.

IPCC 5차 보고서에서도 사용된 통합 평가 모델(Integrated Assessment Model)에서 사용된 비용 편익 분석에서는 생태계가 우리에게 제공하는 유무형의 서비스와 같은 편익을 결정하는데 중요한 요인들이 고려되지 않았다 (Moss and Schneider, 2000). 기후변화가 일어날 때 생태계의 큰 변화가 일어날 것은 자명한 사실이며, 따라서 지금까지 우리가 혜택을 받던 생태계 서비스는 제한적으로 공급될 수밖에 없으며 이는 큰 경제적 피해를 줄 것이다. 2002년 IPCC 보고서에서는 이러한 문제점을 지적하며 전통적인 편익 비용 분석보다는 위기관리 접근 방법(risk management approach) 을 강조하였으며, 2014년 IPCC 보고서에서는 이 부분에 대해 더욱 자세하게 이 부분을 언급하고 있다(Kunreuther et al., 2014). 특히 지난 반세기 동안의 과학적 연구 때문에 기후변화와 그 원인 등에 대해서 많은 과학적 진보가 있었다. 물론 앞서 언급된 것처럼 도시와 같은 국지 규모나 지역 규모에서는 아직 기후 정보의 불확실성이 크다는 사실도 인정해야 한다. 이렇게 불확실성과 위험 요인이 공존하는 상황에서 정책적 결정을 하는 데는 개인의 경험과 직관에 기반을 둔 직각 분석(intuitive analysis)에만 의지하지 않고, 공론 분석 (deliberative analysis)을 통한 다양한

옵션에 대한 체계적 수행이 동시에 이루어져야 정책의 효과를 높일 수 있다(Kunreuther et al., 2014). 이런 의미에서 2014년 IPCC의 재난 관련 보고서의 주요 사항을 여기서 다시 언급하는 것이 의미가 있다.

1. 소통의 중요성: 기후변화 문제에 대한 각각의 개개인의 다양한 방법의 다양성과 편향성을 이해하고 정책 결정자의 결정 과정을 이해함으로써 기후변화의 위험성에 대해 더욱 효과적으로 의사소통할 수 있다. 이를 통해 추진 정책의 더욱 큰 효과를 가져올 수 있다.
2. 비용 편익 분석의 특성 이해: 정책 결정 과정에서 흔히 사용되는 편익 비용 분석에는 개인의 감정에 기반을 둔 직각 결정(intuitive decision making)과 규칙 기반의 공론 결정(deliberative decision making)이 모두 사용되고 있으며 이에 따라 편익 비용 분석의 결과가 과거 개인의 경험이나 사회적 맥락과 문화적 요인에 영향을 받음을 이해하는 것이 필요하다.
3. 비용 편익(cost-benefit) 분석/비용 효과(cost-effectiveness) 분석의 한계: 비용 편익 분석은 정책 결정자들에게 기후변화 관련 정책 결정 과정에서 여러 가지 대안에 대한 사회적 비용과 이득을 비교할 수 있는 유용한 방법이지만 특히 위에서 언급한 발생 확률은 낮지만, 대형 재난을 일으킬 수 있는 극한 현상이나 급격한 기후변화에 대한 효과는 다룰 수 없다. 이는 이런 현상 발생 빈도가 낮아 이에 대한 우리의 경험이 없기 때문이다. 그리고 비용 효과 분석은 기후변화의 영향으로 인한 비용 산출의 불확실성을 고려하지 않고 온실가스 농도를 안정화하는데 필요한 비용을 산정할 수 있는 유용한 방법이다. 하지만 목표로 삼는 수준의 경제적 효율성을 고려할 수 없다는 한계가 있다.
4. 전문가 집단의 중요성: 전문가 집단의 판단을 통해서 관련 정책의 불확실성을 줄일 수는 없지만, 그 불확실성이 가지는 특성과 의미를 이해하는 데는 매우 유용함이 알려져 있다. 우리나라의 경우 전문가 집단의 다양성과 일반 국민의 신뢰성 회복이 선행되는 것이 중요하다.
5. 과학과 정책 연계의 불확실성: 융복합 연구에서 발생하는 연구 접근 방법의 차이와 같은 패러다임에 의한 불확실성, 문제를 정의하는 필요한 정보의 부족에 의한 인식론적 불확실성과 과학 연구의 불확실성과 모순들을 각자 원하는 데로 해석하면서 발생하는 불확실성은 과학자와 정책 결정에 참여하는 사람들과의



관계에 영향을 준다. 이와 관련하여 정책 결정의 어느 단계에서 일반 대중들의 의견을 청취함으로써 정책의 회의적 시각을 줄이고 합법성을 확보할 수 있다.

6. 온실가스 배출과 기후변화 관계의 불확실성: 온실가스 배출을 기후변화와 연결하는 여러 요인에 존재하는 불확실성을 고려할 때 기후변화 완화를 위한 투자에서의 사회적 이익은 증가한다.
7. 불확실성에 대한 대응: 주요 불확실성에 대한 정책 결정자의 대응에 따라 기후 정책과 수단의 타당성은 영향을 받는다. 시장 행태나 미래의 규제 불확실성은 정책에 해로운 영향을 줄 수 있다. 예를 들어, 보조금 자체는 상대적으로 시장의 불확실성에 면역되어있지만, 보조금 기간과 양의 불확실성은 저탄소 사회 기반 시설에 대한 투자를 줄이고, 소비자 물가를 상승시키며 기술개발에 대한 압력을 줄이는 등의 부작용을 낳을 수 있다.

VI

시사점 및 정책 제언



VI

시사점 및 정책 제언

Policy proposals for multidisciplinary research for health and disaster response in a changing climate

1. 기후변화

가. 대기과학 연구의 패러다임 전환의 필요성

- 지난 수십 년간의 연구를 통하여 지구의 평균 기온이 급격하게 상승하고 있으며, 이러한 급격한 기온의 상승이 인류의 화석 연료 배출과 밀접하게 연관되어 있음을 밝히는 과학적 성과가 있었다.
- 우리나라의 대기과학은 기후 연구에 집중하여 전 지구 기온 상승에 관한 효과와 이와 연관된 엘니뇨 현상의 변화 등에서 세계적 수준의 연구를 수행하고 있으며, 이러한 기후학적 접근 방법을 다른 대기과학 분야에 적용하고 있다.
- 하지만 전 세계적으로 지역 및 도시 규모에서의 기후변화에 대한 우리의 과학적 이해도는 매우 낮아 기온 상승 이외에 강수량의 시공간 변동 등은 여전히 불확실성이 크다.
- 이와 함께 도시 개발과 연관된 도시 폭염 현상, 태양 변동성에 따른 강수 변화와 통신 불능, 생태계의 급격한 변화의 재현과 같이 우리 사회의 안정성을 크게 해치는 현상들은 상대적으로 연구 지원과 전담 연구기관이 없었던 것도 사실이다.
- 이러한 재난을 방재하는 대기과학은 단순한 기후학적 접근 방법을 넘어서 기초과학으로서의 원천기술과 장기간의 연구 투자가 필요한 공공성이 매우 강한 연구 분야이다.
- 1980년대 이후 인공지능 원천 기술에 대한 투자가 이루어지지 않으면서 알파고 출현이후 인공지능에 대한 관심은 증가하였지만, 관련 원천기술이 없고, 피상적인 엔지니어링 접근이 이루어지고 있는 현실은 이러한 재난 대비를 위한 대기과학 기초 기술 투자에 시사하는 바가 매우 크다.
- 일기예보를 위한 기상학적 접근 방법에서 벗어나 다양한 과학 분야와 정책의 효과를 높일 수 있는 대기과학 분야의 원천 기술 개발이 필요하다.



나. 방재와 지속가능한 보건을 위한 대기과학 연구

- 최근의 기후변화는 우리가 이제까지 구축해온 재난 위험을 줄이기 위한 노력과는 다른 새로운 협력과 실행 방안이 요구되는 매우 도전적인 문제가 되었다. 국제적 노력을 통하여 그동안 배출한 화석 연료의 효과가 사라진다고 하더라도 비가역적인 지구시스템을 고려할 때, 지구의 기후가 산업화 이전으로 돌아갈 수 있을지 확인하기 어려운 실정이다. 이는 우리가 그동안 겪어보지 못한 환경에 맞닥뜨릴 수 있다는 것을 시사하며, 이에 따라 새로운 차원의 연구와 협력이 필요하다.
- 이에 최근 기후 과학은 단순히 온난화 원인에 관한 연구에서 벗어나 지구온난화가 미칠 사회·경제적 효과 분석을 포함하는 융합적 연구를 시도하고 있다. 이와 함께 평균적인 기후 현상이나 전 지구적인 온난화 문제와 더불어, 지역 규모에서 극한 기상 및 기후 현상이 어떻게 일어날 것인지에 대한 연구가 진행되고 있다.
- 최근 일어나는 가뭄, 홍수, 폭염, 미세먼지, 지진과 같은 자연재해는 현재의 현생 인류뿐만 아니라 지구시스템의 모든 구성원이 겪어보지 못한 이례적인 빈도와 강도를 보여주고 있다. IPCC 보고서에 따르면 지구온난화를 산업혁명 이전의 1.5℃ 이하로 유지하지 못할 경우, 전 인류에게 재앙이 일어날 수 있음을 경고하였으며, 이러한 위기의식은 2015년 12월 파리협정으로 반영되었다. 하지만 현재 우리나라에서 이들 분야의 연구개발은 연구 분야 간 장벽을 허물지 못하고, 개별 부처에서 단기적 관점에서 이루어지고 있는 실정이다.
- 기후변화 연구에서 지구시스템 수치 모델이 가지는 중요한 역할에도 불구하고 여전히 모델의 개발과 관련하여 많은 문제를 해결해야 한다. 대기 모델의 불확실성은 지역 규모 및 국지 규모에서는 더욱 커지는데, 우리나라와 같이 바다와 접해있고, 산악 지형이 많은 곳에서는 그 불확실성이 매우 크다. 따라서 수많은 인구가 모여있는 대도시에서의 지식의 불확실성을 줄이기 위해서는 직접관측을 통한 진단 분석과 지역 규모 및 국지 규모 모델 개발 연구가 수행되어야 할 것이다. 이는 대류권이나 성층권 포함하지 않고 전체 대기를 포함해야하며, 궁극적으로 이러한 지식의 진보는 향후 일기예보의 정확도 향상에도 기여할 것이다.
- 이는 전반적으로 지구시스템 모델의 개발 향상과 더불어, 현재 현업기관에서만 사용 가능한 모델이 아니라 전 세계적으로 주목받고 있는 커뮤니티 모델 기반의 개발과 초고층 및 중층 대기 역학, 경계층 역학 연구가 물리 및 수학

연구자들과의 교류와 함께 이루어져야 집단 지성의 장점을 최대한 활용하여 우리나라에 발생 가능한 다양한 자연재해에 대한 대비책을 세우는데 이바지할 수 있다.

- 현실적인 관측 자료의 생산은 기후변화의 감지, 위험기상의 예보 적중률 향상에 필수적으로, 정확한 일기예보 및 기후예보 모델과 더불어 가장 두 요소 중 하나이다. 또한, 정확한 관측 자료의 제공은 기상 및 기후자료를 사용하는 관계 기관들의 가장 큰 요구사항이 되어 왔다. 그러나 우리나라는 선진국과 비교할 때, 기상 및 기후 관측 분야의 투자가 거의 이루어지지 않고 있어서 그 수준이 현저하게 떨어지는 실정이다. 이에, 우선 측정 과학에 관한 연구 투자 및 측정 자료의 품질 분석에 관한 기초 연구가 조속하게 진행되어야 한다.
- 이러한 기초적 연구는 1~2년 내의 단기성과 위주의 연구 결과물이 필요한 정부 부처 기관보다는 박사급 연구 인력양성을 담당하는 대학과 정부 또는 민간의 출연금을 기반으로 한 연구기관과의 협업이 이루어지는 미국의 국립기상연구소(National Center for Atmospheric Science)나 기초과학 기반으로 대학과 연계된 독일의 막스플랑크연구소(Max Planck Institute) 같은 모델이 적절할 것으로 판단된다. 이와 함께 관련 연구 집단은 정부의 현업기관으로부터 재정적으로 독립함으로써 단기간의 공학적 접근방법에서 벗어날 수 있는 제도적 장치가 필요하다.
- 극한 기후 및 기상 현상에 대한 국내외 연구를 종합해보면, 중국을 중심으로 한 동아시아의 관측 자료 기반 연구는 폭염 및 폭우의 발생 빈도에 증가에 대한 대비가 필요함을 알 수 있다. 이런 연구들은 일반적으로 우리나라의 시군구를 구별할 수 있는 정도의 정보를 제공하지 않기 때문에 중규모 및 미세 규모 수준의 연구가 체계적으로 이루어져야 할 것이다. 우리나라의 경우, 관련 연구가 매우 부족한 실정이며, 관련 주제에 대한 체계적인 연구가 진행되지 않았다. 기상청, 산림청, 소방방재청과 같은 현업기관과 대학에서 관측 장비의 구매를 통한 양적인 예산 확대를 통하여 자료 생산에만 초점을 맞추면서 직접 관측 자료의 분석에는 소홀히 한 것이 사실이다.
- 기후변화에 따라 폭염, 가뭄, 홍수와 같은 자연재해의 발생 빈도와 강도, 지속시간이 증가할 것으로 예상하며, 이러한 자연재해가 에너지, 식량, 수자원에 동시에 영향을 미침을 이해해야 한다. 이에 따라 에너지-식량-수자원-도시-기후-환경의 통합적 사고에 기반을 둔 정책 결정 과정이 고려되어야 한다. 가뭄에 대한 사회적 관심과 다양한 분야에서의 연구에도 불구하고, 우리나라의 가뭄 발생 현황의 특성 변화



여부와 미래 전망은 명확한 연구결과가 만들어지지 않았다. 가뭄의 특성상 분야별 가뭄의 피해가 매우 다양하기 때문에 이에 대한 선제 대응이 필요함과 동시에 대기 과학 및 수문학 분야의 원천 지식에 기반한 기본 메커니즘을 이해하는 기초 연구가 수행되어야 한다.

- 가뭄, 홍수, 폭염과 같은 극한 기상 및 기후 현상과 급격하고 비가역적 기후변화의 발생을 보다 이른 시간에 예측할 수 있는 조기경보 시스템은 향후 닥쳐올 기후변화에 따른 재난의 피해를 최소화하는데 매우 유용할 것이다. 이를 위해서는 다양한 자료와 모델과 지구시스템 모니터링 자료를 활용하는 대기과학의 기초 연구가 필요하다.
- 지난 20여 년 동안 우리나라의 기후 과학은 전구 규모에서의 자료 분석을 통하여 훌륭한 연구 결과를 만들어냈다. 하지만 기후변화의 자연 변동성과 초고층 대기에서의 태양 활동에 따른 기후 변동성에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았으며 연구 지원도 적어 전문가 집단이 형성되지 못하고 있다.
- 미래 기후에서의 자연 재난 상황이 자연 변동성 및 태양 활동과 밀접하게 연관돼 있음을 고려할 때 위 분야에 관한 연구 지원이 이루어져야 할 것이다. 기후 예측 자료 기반의 연구는 우리나라에서 다른 연구 분야보다 상대적으로 많이 이루어졌으나, 실제 정책 결정자들의 활용성이 높은 비교적 고해상도의 자료 분석 연구는 상대적으로 부족하였다. 미기상학에서부터 기후변화 및 우주 기상학에 모두 활용될 수 있는 대기 역학 기반의 기초 연구와 유체 역학의 이론적 기반의 연구를 통하여 우리나라의 기후변화 현황을 보다 자세하게 알아볼 수 있는 연구가 필요하다.
- 최근 태양 활동과 관련된 기후의 자연 변동성이 주목받고 있으며, 미국 NASA의 파커 태양 탐사선을 시작으로 선진국에서는 다양한 관련 연구가 수행되고 있다. 기후 예측 모형의 성능 개선과 예측 능력 향상뿐만 아니라 우리나라에서 향후 진행될 인공위성 발사사업 및 우주 개발 사업에서의 재난 상황에 대비하기 위하여 국가적으로 초고층을 포함하는 모델 개발 사업과 자료 분석에 관한 연구가 수행되어야 한다. 성층권 이상을 포함하는 모델 전문가와 지구시스템 모델 개발은 해외의 사례로 보았을 때 대학이나 현업기관에서 담당하기 어려우며 별도의 독립된 연구기관이 대학과의 협력 체계를 구축하여 운영하는 것이 바람직하다.
- 위험기상, 우주 재난, 폭염, 대기질 문제 등 국가적 차원에서 해결해야 할 많은 문제를 효율적으로 해결하기 위해서는, 대기과학 분야의 원천 기술을 개발하고,

원천 기술 개발에 장시간이 소요되는 점을 고려하여 학문의 연속성에 주의를 기울여한다. 이러한 측면에서 대학과 연계된 새로운 연구 기관이 필요하다.

- 현재 기상, 기후 분야에 투자된 연구개발 예산은 상당 부분 외부 수탁 사업 형태로 대학에서 진행되고 있는데, 석·박사 학생들의 양성이라는 대학 연구의 특성과 1년 미만의 단기간 연구로 인하여 원천 기술 확보가 쉽지 않다. 앞서 언급된 미국이나 독일 연구소의 예처럼 대학과 정책 결정자와의 새로운 관계 모델로서 교육과 기초 연구를 통하여 새로운 기후변화예의 도전을 준비하는 것이 필요하다.
- 기상 및 기후 연구 분야는 그 공공성의 특성상 민간 기업의 연구소가 전무한 특별한 분야이다. 급변하는 기후변화와 사회경제 환경 속에서 다양한 사회문제를 해결하기 위한 원천 기술개발이 필요한 상황에서 박사급 고급인력들이 양질의 연구를 수행할 수 있는 독립된 연구 기관의 설립이 절실한 실정이며, 이는 관련 분야의 연구·개발을 가장 효율적으로 집행할 방안이기도 하다. 이렇게 설립될 연구소는 자체 연구 성과만으로 평가받을 수 있도록 기상청과 같은 현업기관으로부터 독립적으로 운영되어 정책과 연관된 정부 상위 부처 관리/감독을 받도록 하는 것이 바람직하다.



2. 도시 개발과 도시 기후

가. 도시에 대한 재난, 보건, 대기과학의 학제간 연구의 필요성

- 2018년 현재 전 세계의 절반 이상이 도시에 거주하고 있으며, 도시로의 인구 유입도 매우 빠르게 일어나고 있다. 다양한 자연재해 및 재난 사고에 대해 대규모 인구가 거주하는 도시의 안정성과 지속가능성을 유지하기 위해서는 앞서 언급한 자연재해를 사전에 대비하는 과학 기술적 접근 방법과 함께 이를 기반으로 하는 정책적 연계 방안이 필요하다.
- 우리나라와 같이 대규모 도시 재개발이 진행되는 곳에서는 미래의 극한 기후 및 환경 변화의 영향을 평가할 수 있는 제도적 장치가 마련되어야 한다. 특히 도시 규모에서의 재해 진단 및 예측 기술은 여전히 매우 큰 불확실성이 존재하며, 이를 해결하기 위한 과학적 노력과 함께, 불확실성을 고려하는 정책적 결정이 이루어져야 한다.
- 도시 규모에서의 기후 예측이 가지는 매우 큰 불확실한 상황에서 극한 자연재해 발생에 관한 정보가 부족하고, 각종 재해에 취약한 계층을 보호하는 것은 정의로운 사회 구현뿐만 아니라 사회 안정성을 위해서 매우 필요한 조치임을 이해하는 것이 필요하다. 이를 위해 어떤 수준의 정책을 조합하여 제공할 정보의 우선순위를 결정하는 것이 중요한데, 이러한 결정 과정은 전문가 집단의 신뢰성을 확보하고 정책의 성공을 위해서 수평적, 수직적 의사소통을 시행하는 것이 필요함을 정책 결정자들은 인지할 필요가 있다.
- 인류 문화, 인간 활동 및 과학기술 성과의 집합체가 도시임을 인지하고, 국가 이미지 향상과 수출품으로서의 도시의 역할에 대한 발상의 전환이 필요하다.

나. 재난에서 안전한 도시를 위한 정책적 제고

- 지속가능한 도시를 위한 완화 정책 및 적응 정책을 결정하는 데 있어서 국가, 도시 및 지자체별 정책의 수직적 일관성을 유지하고, 이해당사자와 도시 및 중앙 정부 사이의 수평적 협력 관계가 이루어질 수 있는 제도적 장치 마련이 필요하다.
- 최근 정부에서도 대통령직속 4차산업혁명위원회 스마트시티 특별위원회를 구성하였고, 스마트 시티 시범 도시 선정을 통한 관련 연구개발 사업과 대응이 다양한 부처에서 진행되고 있다. 스마트 시티 건설 및 지원 사업이 국토 개발,

에너지 효율성 및 정보통신 기술의 고도화에 초점이 맞추어져 있지만, 극한 기후 현상 및 급격한 기후변화, 미세먼지, 폭염과 같은 대형 복합 재난 대응을 위해 도시 기후 전문가를 참여시키고 다양한 환경적 측면에 대해 더욱 고민해야 한다.

- 이를 기반으로 도시의 개발이 단순히 국토의 효율적 이용이라는 과거의 국토 개발 종합사업에서 벗어나 도시의 재개발 및 개발이 가져올 국지 기후 및 대기 환경에 미치는 영향에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 한다.
- 폭염이 더욱 빈번하게 발생하고, 기온을 낮추는 도시 숲의 순기능에 대한 언급이 많아지면서 숲에 대한 신화적 믿음이 일반 국민 사이에 넓게 퍼져있다. 건물 대신에 숲과 공원을 조성하면 기온을 낮출 수는 있으나 나무의 생물학 및 생태학적 특성에 따라 다양한 환경 요인에게 영향을 준다는 사실은 국내에서 제대로 고려되지 않고 있다. 1990년대 시카고 폭염과 관련하여 시카고에서 이루어진 대기과학과 생태학을 포함하는 다학제간 연구와 최근 미국 텍사스 오스틴에서 진행된 도시 녹지에 관한 연구는 우리나라 도시 개발 정책과 환경 정책에 시사하는 바가 매우 크다.
- 최근 제시된 압축 도시나 스마트 시티의 구현 과정에서 건축 법규 및 토지 규제 등을 통하여 도시 스프롤 현상을 줄이고, 건물의 에너지 효율성을 높이며, 건물의 높이를 올리고 녹지 면적을 확보하는 방법 등을 이용하여 온실가스 배출량을 줄이고, 재해에 강한 도시 정책을 위한 제도적 장치가 뒷받침되어야 한다. 특히 전문가 집단의 신뢰성 회복을 위하여 시민과의 소통을 통해 정책과 전문가의 신뢰성을 회복하고 효과적인 다양한 방법을 개발하고 적용해야 한다. 관련하여 효과적인 거버넌스를 위하여 지방 자치 단체, 광역단체, 국가와의 법률적 불일치를 해결해야 한다.
- 지속가능한 도시를 위한 다양한 도시 개발에서 에너지, 수자원, 식량, 대기 오염 및 폭염 등의 복합적 측면을 고려할 수 있는 전문가의 참여와 지역 사회와의 소통의 폭을 넓히는 것이 필요하다. 특히 도시 및 지역 규모의 기후 및 기상 현상에 대한 관측을 통한 감시와 기초 연구 수행을 위하여 대학과 대기과학 기초 연구 기관의 설립을 통한 협력 방안을 고민해야 할 시점이다.



3. 기후변화와 보건

가. 새로운 기후 변화를 고려하는 보건시스템 확립의 필요성

- 다양한 자연재해에 의해 우리의 보건은 영향을 받아왔으며, 최근 빈번하고 미래에 더욱 빈번할 것으로 예상하는 극한 기상 현상과 급격한 기후변화는 기존의 보건 방지 시스템으로 대응하기 어려울 것이다. 이와 함께 여러 가지의 재난이 동시에 발생하는 복합 재난의 발생도 빈번해질 것으로 예상된다.
- 대규모의 도시화가 빠르게 일어남에 따라 도시는 그 자체로 복합 재난에 취약할 수밖에 없다. 특히 기후변화로 유도된 건강 문제는 도시의 하부구조에 의해서 더 증폭되거나 악화하여 나타날 수 있는데, 적절한 시기에 적절한 대책이 준비되어 있지 않으면 도시의 환경은 도시가 아닌 지역보다 다양한 자연재해의 강도가 강하고, 따라서 이에 대한 도시 거주민의 노출이 급격하게 증가할 수밖에 없다.
- 도시화가 급격하게 진행되고 도시가 팽창함에 따라 자연재해에 취약한 산악 지형이나 저지대로 확장된 도시지역은 지구온난화와 도시 열섬 현상의 증첩으로 인하여 극한 현상에 의한 피해에 폭염에 취약할 수밖에 없다. 극한 현상으로 인한 건강 피해는 후진국이나 개도국뿐 아니라, 보건시스템이 잘 구축된 선진국에서도 흔히 발생하고 있다.

나. 안전한 보건시스템을 위한 정책적 제고

- 기후변화와 연관하여 도시에 자연재해가 발생하는 경우, 도시의 사회 기반 시설이 제대로 기능하지 못함으로써 다양한 종류의 보건 문제가 발생할 수 있으며, 관련된 질병과 도시에 미치는 효과를 파악하여 우선순위가 필요한 연구 분야를 파악해야 한다.
- 도시 확장과 재개발 등으로 인하여 폭염은 지구온난화 이상의 강도로 도시에 영향을 줄 가능성이 크다. 이에 대한 보건시스템의 대비가 필요하다. - 최근 우리나라의 경우 대기오염물질 중에서 미세먼지에 관한 대중적인 관심이 매우 높지만, 오존 증가와 같이 다양한 대기 오염 문제가 발생할 수 있다. 한 부처의 특정 재난에 대한 정책이 다른 환경 문제를 일으킬 수 있는지 보다 복합적인 연구와 기초 연구가 필요하다. 특히

미세먼지 농도의 대체적인 감소에도 불구하고 일반 시민들의 불안감과 불신이 커진 점을 반면교사로 삼아, 다양한 분야의 전문가와 함께 정부 정책의 신뢰를 회복할 수 있는 지역 주민들과의 소통이 요구된다.

- 세계보건기구를 중심으로 기후변화에 대처하는 의료 복지 모델로 보편적 의료 복지를 제안하고 있다. 우리나라는 이러한 보편적 의료 복지를 매우 빠르게 시작한 나라로서 기후변화에 취약한 계층을 보호할 수 있는 시스템이 일정 부분 갖추어져 있다. 하지만 앞서 언급한 극한 기후변화와 복합 재난의 발생을 대비하고, 국민건강보험의 재원 모델과 연계한 지속가능한 보건 체계를 만드는 문제에 대한 준비가 필요하다.



4. 재난과 경제성 평가

- 극한 기상 현상과 급격한 기후변화는 발생 확률은 낮지만 발생하면 미치는 어마어마한 사회경제적 피해 때문에 다양한 방법에서의 연구가 필요하다. 이를 위해서는 전 지구 규모의 연구뿐만 아니라 지역 및 국지 규모에서의 연구와 함께 다양한 학문적 다양성을 존중하는 기초 연구와 기초 연구 기관의 정립이 필요하다. 특히 이렇게 발생 확률이 낮은 현상들의 발생을 빠르게 진단할 수 있는 관측 자료 기반의 진단 분석 연구가 꾸준히 진행되어야 한다.
- 우리나라에 최근 큰 사회 문제가 된 미세먼지 문제와 지구온난화와 극한 현상의 빈번한 발생은 지난 수십 년간 이루어 낸 우리 과학기술 연구성과와는 다른 접근방법과 지원이 필요하다. 복합 재난의 발생과 서로 다른 자연재해가 서로 다른 시공간에 일어날 때 하나의 특정한 재해에 맞추어진 정책은 다른 재난에 매우 취약한 구조를 만들 수밖에 없다. 예를 들어, 폭염의 완화를 위해 도시 건물의 상당 부분을 녹지화할 경우, 불쾌지수의 상승이나 기온 하강에 따른 미세먼지 농도 상승을 유발할 가능성이 존재한다. 이러한 비선형적이고 복합적인 문제를 해결하기 위해서는 부처 간 학문 간 벽을 허물고 문제 해결 중심의 다학제간 연구가 우리 사회 구성원들의 요구를 충족하기 위해서 시급히 정립되어야 한다. 이와 함께 과학적 결과에 기반을 둔 정책적 활용을 가능하기 위해서는 국내 기후 환경 변화에 맞는 체계적인 기후변화 리스크 평가 방법의 개발이 시급하다.
- 대형 재난과 복합 재난에 대한 전 세계적인 협력을 위해 채택된 효고 행동 강령 2005~2015(Hyogo Framework for Action 2005~2015) 이후 이를 계승하고 발전시킨 센다이 재난 위험 경감 강령(Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015~2030)이 제시한 국가 및 지역 수준에서의 행동 및 법제화를 이룬 시일 내에 검토하고 실행해야 한다. 특히 우리나라의 환경 및 상황에 맞는 정책 수립 및 평가를 위해 다양한 분야의 전문가들과 이해당사자의 의견이 반영될 수 있는 재난관리 거버넌스 체계를 구축하고 재난 관련 교육을 강화해야 한다. 특히 재난 및 안전 문제에 있어서 세계 최고 선진국이었던 스웨덴도 2018년 260년만의 최고 폭염과 산불로 인하여 엄청난 피해를 받았다. 우리나라도 경각심을 가지고 재난 문제에 있어서 그간의 재난방지책에 대한 평가와 보완이 필요하다.
- 기후변화의 편익 비용 산정 과정이 추적될 수 있도록 해야 하며, 이를 통해 사용된 모델의 한계와 문제점들을 적절하게 평가할 수 있다. 특히 할인율 산정과 세대 간

차이에 대한 문제 등에 있어서, 극한 기상과 돌이킬 수 없는 급격한 기후변화를 다루기 위한 연구가 필요하다.

- 기후 완화 및 적응 정책은 대부분 국지적인 지역의 문제이며, 따라서 지역 시민의 참여와 지방자치단체의 효과적인 반응을 일으키는 것이 매우 중요하다. 따라서 지역 시민이 자발적으로 참여할 수 있고, 지역의 고위험 취약 집단의 사람들을 돌볼 수 있는 다양한 방법들이 고안되어야 한다.
- 기존의 재난 분석은 발생할 확률이 높지 않지만 발생했을 때 대형 재난이 발생할 수 있는 자연재해를 고려하지 않았다. 우리나라에 직간접적으로 영향을 줄 수 있는 극한 현상, 급격한 변화, 지구 자기장 변동과 같은 분야의 연구를 강화함과 동시에, 지역 자치단체 수준의 적응 완화 정책을 지원하기 위한 시나리오 기반의 사회과학적 연구와 일반 시민들의 참여 및 교육 프로그램 등이 지속해서 이루어져야 한다.
- 최근 인공지능 기술에 관한 급격한 관심에도 불구하고 우리나라는 인공지능 원천 기술은 거의 가지지 못하고 있다. 이는 인공지능 기술에 관한 연구 투자가 거의 이루어지지 못하면서 학문의 다양성이 확보되지 못한 것이 원인이다. 그러나 인공지능 기술을 이용하여 향후 장기간의 기후변화 현상을 이해하기 위한 기초 연구와 함께, 실제 정책 결정자들과 국민이 체감할 수 있는 직접관측 기반의 도시 규모 연구와 중규모 현상의 대기 역학 분석 연구에 대한 지원이 필요하다.
- 이러한 새로운 기후변화 양상을 이해하고 불확실성을 개선할 수 있는 기초 과학적 소양을 가지고 있으며, 이러한 기초과학 지식을 활용하여 새로운 기후변화의 사회경제적 측면을 이해하고 적응 및 완화 정책을 지원할 수 있는 싱크 탱크 역할을 수행 할 수 있는 과학자와 연구기관이 필요하다. 이와 함께 장기간의 기초과학 연구에 근거한 원천 기술에 의한 극한 기상 및 기후변화 예측보다는 국외에서 생산된 자료에 기반을 둔 공학적 접근이 주를 이루고 있는 실정으로, 새로운 변화에 대비하는 장기적인 관점에서 관련 과학 원천 기술개발 연구가 수행되어야 한다.



참고문헌

- Alexander, L., Zhang, X., Peterson, T., Caesar, J., Gleason, B., Tank, A. K., et al.(2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
- Baklanov, A., Grimmond, C. S. B., Carlson, D., Terblanche, D., Tang, X., Bouchet, V., et al.(2018). From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services. *Urban Climate*, 23, 330~341.
- Barata, M., Ligeti, E., De Simone, G., Dickinson, T., Jack, D., Penney, J., et al.(2011). Climate change and human health in cities. In *Climate Change and Cities First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*, Cambridge University Press, pp. 179~213.
- Berry, P., Clarke, K., Fleury, M. D., & Parker, S.(2014). Human health. In Warren, F. J., & Lemmen, D. S.(Eds.), *Canada in a changing climate: Sector perspectives on impacts and adaptation*, pp. 191~232.
- Berry, P., & Richardson, G. R.(2016). Approaches for building community resilience to extreme heat. In Steinberg, S. L., & Sprigg, W. A.(Eds.), *Extreme Weather, Health, and Communities: Springer*, pp. 351~388.
- Boo, K. O., Kwon, W. T., & Baek, H. J.(2006). Change of extreme events of temperature and precipitation over Korea using regional projection of future climate change. *Geophysical Research Letters*, 33(1).
- Chou, Y.-M., Jiang, X., Liu, Q., Hu, H.-M., Wu, C.-C., Liu, J., et al.(2018). Multidecadally resolved polarity oscillations during a geomagnetic excursion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201720404. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720404115>.
- Clark, R. T., Murphy, J. M., & Brown, S. J.(2010). Do global warming targets limit heatwave risk? *Geophysical Research Letters*, 37(17).
- Claussen, M., Kubatzki, C., Brovkin, V., Ganopolski, A., Hoelzmann, P., & Pachur, H.

- J.(1999). Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the mid-Holocene. *Geophysical Research Letters*, 26(14), 2037~2040.
- Confalonieri, U., Menne, B., Akhtar, R., Ebi, K. L., Hauengue, M., Kovats, R. S., et al.(2007). Human health. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press
- Costello, A., Abbas, M., Allen, A., Ball, S., Bell, S., Bellamy, R., et al.(2009). Managing the health effects of climate change: lancet and University College London Institute for Global Health Commission. *The Lancet*, 373(9676), 1693~1733.
- Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., & Dahe, Q.(Eds.). (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change.*, Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, pp. 3~21.
- Frumkin, H., Hess, J., Lubet, G., Malilay, J., & McGeehin, M.(2008). Climate change: the public health response. *American journal of public health*, 98(3), pp. 435~445.
- Grimmond, C., Beig, G., Brown, B., Carmichael, G., Fang Zheqing, C., Garcia, A., et al.(2014). *Guidelines for Establishing Weather, Climate, Water and Related Environmental Services for Megacities and Large Urban Complexes: Integrated Urban Weather, and Climate Service*. WMO, Geneva.
- Groner, V. P., Raddatz, T., Reick, C. H., & Claussen, M.(2018). Plant functional diversity affects climate-vegetation interaction. *Biogeosciences*, 15(7), 1947~1968.
- Habitat, U. N.(2016). *HABITAT III New urban agenda. Draft outcome document for adoption in Quito, October 2016*.
Retrieved from <https://habitat3.org/the-new-urban-agenda>.
- Hong, J.-W., & Hong, J.(2016). Changes in the Seoul metropolitan area urban heat environment with residential redevelopment. *Journal of Applied Meteorology*



- and Climatology, 55(5), 1091~1106.
- Hong, J., & Kim, W. S.(2015). Weather impacts on electric power load: partial phase synchronization analysis. *Meteorological Applications*, 22(4), 811~816.
- Im, E. S., Jung, I., & Bae, D.(2011). The temporal and spatial structures of recent and future trends in extreme indices over Korea from a regional climate projection. *International Journal of Climatology*, 31(1), 72~86.
- Ineson, S., Scaife, A. A., Knight, J. R., Manners, J. C., Dunstone, N. J., Gray, L. J., & Haigh, J. D.(2011). Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, 4(11), 753.
- Jones, S., & Golding, B.(2014). HIWeather: A research activity on High Impact Weather within the World Weather Research Programme. Implementation Plan, WWRP.
- Retrieved from http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/HIW_IP_v1_4.pdf.
- Kidston, J., Scaife, A. A., Hardiman, S. C., Mitchell, D. M., Butchart, N., Baldwin, M. P., & Gray, L. J.(2015). Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nature Geoscience*, 8(6), 433.
- Kim, C., Suh, M.-S., & Hong, K.-O.(2009). Bayesian changepoint analysis of the annual maximum of daily and subdaily precipitation over South Korea. *Journal of Climate*, 22(24), 6741~6757.
- Kunreuther, H., Gupta, S., Bosetti, V., Cooke, R., Dutt, V., Ha-Duong, M., et al.(2014). Integrated risk and uncertainty assessment of climate change response policies. In Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., et al. (Eds.).(2014). Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Lee, W.-J., & Hong, J.(2015). A hybrid dynamic and fuzzy time series model for mid-term power load forecasting. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 1057~1062.

- McBean, G., & Henstra, D.(2003). Climate change, natural hazards and cities: Institute for Catastrophic Loss Reduction.
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., & White, K. S. (Eds.), (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 2, pp. 1032). Cambridge University Press.
- McNeall, D., Halloran, P. R., Good, P., & Betts, R. A.(2011). Analyzing abrupt and nonlinear climate changes and their impacts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(5), 663~686.
- Mehrotra, S., Natenzon, C. E., Omojola, A., Folorunsho, R., Gilbride, J., & Rosenzweig, C.(2009). Framework for city climate risk assessment. Paper presented at the Fifth Urban Research Symposium, Marseille, France.
- Min, S.-K., Son, S.-W., Seo, K.-H., Kug, J.-S., An, S.-I., Choi, Y.-S., et al.(2015). Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: A review. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 51(2), 103~121.
- New York City Panel on Climate Change(2017).
Retrieved from <http://www.adaptationclearinghouse.org/organizations/new-york-city-panel-on-climate-change-npcc.html>
- Nickson, A., Woolston, H., Daniels, J., Dedring, I., Reid, K., Ranger, K., et al.(2011). Managing risks and increasing resilience: the Mayor's climate change adaptation strategy. Greater London Authority, London Google Scholar.
- Orlowsky, B., & Seneviratne, S. I.(2012). Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. *Climatic Change*, 110(3-4), 669~696.
<http://doi.org/10.1007/s10584-011-0122-9>
- Team, C. W., Pachauri, R. K., & Meyer, L. A. (2014). IPCC, 2014: climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I. II and III to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.



- Paté-Cornell, M. E.(1996). Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. *Reliability Engineering & System Safety*, 54(2~3), 95~111.
- Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Hammer, S. A., & Mehrotra, S.(2011). Climate change and cities: First assessment report of the urban climate change research network: Cambridge University Press.
- Schmeltz, M. T., González, S. K., Fuentes, L., Kwan, A., Ortega-Williams, A., & Cowan, L. P.(2013). Lessons from hurricane sandy: a community response in Brooklyn, New York. *Journal of urban health*, 90(5), 799~809.
- Schneider, S. H., Kuntz-Duriseti, K., & Azar, C.(2000). Costing non-linearities, surprises, and irreversible events. *Pacific and Asian journal of energy*, 10(1), 81~106.
- Schneider, S. H., & Moss, R.(1999). Uncertainties in the IPCC TAR: Recommendations to lead authors for more consistent assessment and reporting. Unpublished document.
- Semenza JC, Rubin CH, Falter KH, Selanikio JD, Flanders WD, et al.(1996) Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *N Engl J Med* 335: 84~90.
- Sheffield, J., & Wood, E. F.(2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate dynamics*, 31(1), 79~105.
- Solomon, S., Plattner, G.-K., Knutti, R., & Friedlingstein, P.(2009). Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the national academy of sciences*, 106(6), 1704~1709.
- Steinberg, S. L.(2016). Interdisciplinary Engagement of People and Place Around Extreme Weather. In S. L. Steinberg & W. A. Sprigg (Eds.), *Extreme Weather, Health, and Communities*: Springer, pp. 89~115.
- Steinberg, S. L., & Steinberg, S. J.(2015). *GIS research methods: incorporating spatial perspectives*: Esri Press.
- Tapsell, S. M., Penning-Rowsell, E. C., Tunstall, S. M., & Wilson, T. L.(2002).

- Vulnerability to flooding: health and social dimensions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1796), 1511-1525.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1013>
- Urban Climate Change Research Network(2017) Regional Hubs. Retrieved from <http://uccrn.org/>
- Vellinga, M., & Wood, R. A.(2008). Impacts of thermohaline circulation shutdown in the twenty-first century. *Climatic Change*, 91(1~2), 43~63.
- Wang, G., & Eltahir, E. A.(2000). Role of vegetation dynamics in enhancing the low-frequency variability of the Sahel rainfall. *Water Resources Research*, 36(4), 1013~1021.
- World Health Organization(2009). Medium-Term Strategic Plan 2008-2013, Amended (Draft) Proposed Programme Budget 2010~2011, A62/11 Climate change and health.
- World Health Organization Regional Office for Europe(2011) Climate change, extreme weather events and public health-Meeting report. Paper presented at Federal Ministry for the Environment - Nature Conservation and Nuclear Safety - Technical support from the German Federal Environment Agency - German Meteorological Service Meeting, 29-30 Nov 2010. Bonn, Germany.
 Retrieved from http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0011/144389/e95103.pdf
- World Meteorological Organization(2015) Abridged Final Report With Resolutions. WMO report #1157. Paper presented at 17th World Meteorological Congress, 25 May-12 June 2015, Geneva.
- Yardley, J., Sigal, R. J., & Kenny, G. P.(2011). Heat health planning: The importance of social and community factors. *Global Environmental Change*, 21(2), 670~679.

한림연구보고서 124

변화하는 기후에서 보건 및 재난 대응을 위한 다학제간 연구에 대한 정책적 제안

Policy proposals for multidisciplinary research for health and disaster
response in a changing climate

발 행 일 2018년 11월

발 행 처 한국과학기술한림원

발 행 인 이명철

전화 031) 726-7900

팩스 031) 726-7909

홈페이지 <http://www.kast.or.kr>

E-mail kast@kast.or.kr

편집/인쇄 (주)세일포커스 02) 2275-6894

I S B N 979-11-86795-31-6 94080

I S B N 979-11-86795-29-3 (세트)

- 이 책의 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.
- 한국과학기술한림원의 동의없이 내용의 일부를 인용하거나 발췌하는 것을 금합니다.



이 책은 한국과학기술한림원에서 발간하는
연구총서 중의 하나인 한림연구보고서입니다.

KAST 한국과학기술한림원
The Korean Academy of Science and Technology

[13630] 경기도 성남시 분당구 돌마로 42 (구미동)

Tel: (031) 726 -7900 **Fax:** (031) 726 -7909

E - mail: kast@kast.or.kr **Website:** www.kast.or.kr

본 사업은 과학기술진흥기금 및 복권기금으로 지원되고 있습니다.

비매품/무료



9 791186 795316

ISBN 979-11-86795-31-6

ISBN 979-11-86795-29-3(세트)