

국가 재난 위기경보단계의 기여사망위험 비교: 폭염과 미세먼지를 중심으로*

Attributable Mortality Risk Comparison of National Warning System Criteria: Focusing on Heat-Wave and Particulate Matter

박종문** · 박종철*** · 채여라****

Jongmun Park · Jongchul Park · Yeora Chae

요약: 최근 국가 재난으로 지정된 폭염과 미세먼지에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 효과적인 국가 재난 관리와 건강 영향 저감을 위하여 국가 위기경보 기준을 바탕으로 두 재난 위험에 대한 체계적인 이해가 필요한 시점이다. 이 연구는 폭염과 미세먼지에 대하여 2015년-2018년 서울 지역을 대상으로 폭염과 미세먼지의 위기경보기준 발령일과 기여사망 수준을 분석하였다. 분석 결과 재난 위험을 효과적으로 관리하기 위하여 경보단계별 기준을 보다 면밀히 검토하고 같은 위험 단계에서 재난 간에 동등한 수준으로 조정할 필요가 있는 것으로 나타났다. 정책적으로는 미세먼지는 고농도 발생일에 초점을 둔 저감대책이 수행될 필요가 있고 폭염은 상대적으로 리스크의 불확실성이 높기 때문에 보다 세밀한 적응대책이 요구된다.
핵심주제어: 폭염, 미세먼지, 리스크, 재난 관리

Abstract: Interest in heat-wave and particulate matter, which the government of South Korea has designated the national disaster, has been increasing recently. To effectively manage these disasters and reduce their health impacts, a systematic understanding of these two disaster risks based on national warning system criteria is important. This study analyzed the excess days and deaths attributable to heat-wave and particulate matter levels exceeding the national warning system criteria in Seoul between 2015 and 2018. The analysis indicated that to control the disaster risk effectively, it is necessary to further examine the criteria within each disaster warning level so that they correspond to similar warning level criteria for the other disasters. Policy measures to reduce particulate matter should focus on high-concentration days. More detailed adaptation measures for heat-wave are required because of greater uncertainty of risk.

Key Words: Heat-wave, Particulate Matter, Risk, Disaster Management

* 이 연구는 기상청 <자연재해대응 영향예보 생산기술 개발>(KMI2018-01410)의 지원으로 한국환경정책·평가연구원(2020-007(R))에 의해 수행되었습니다.

** 주저자, 한국환경정책·평가연구원 초빙연구원

*** 공동저자, 한국환경정책·평가연구원 초빙연구원

**** 교신저자, 한국환경정책·평가연구원 선임연구위원

I. 서론

현대 사회에서는 경제, 사회, 환경 측면에서 다양한 위험이 상존하고 있고 이러한 위험들은 상대적 영향과 발생 가능성이 서로 다른 특성을 가진다. 최근 들어 자연 재해나 악천후, 인위적인 환경 재난 등 환경 관련 위험이 다른 분야의 위험에 비하여 상대적으로 보다 더 중요하게 인식되고 있다(WEF, 2020).

환경 위험 중에서도 폭염과 미세먼지는 최근 고온과 고농도 발생 수준이 높아지면서 사회적 관심이 커지고 있다. 2018년 기상 관측사상 최고기온 발생 등 강한 폭염이 나타났고(관계부처 합동, 2019a), 2019년에는 고농도 미세먼지가 발생하여 2017년 비상저감조치 도입 이래 처음으로 수도권에서 3일 연속으로 시행되었다(국립환경과학원, 2019; 환경부 보도자료, 2019.1.14.).

이러한 위험에 대응하기 위하여 폭염과 미세먼지는 최근 국가 재난으로 지정되었다. 2018년 기록적인 폭염 발생 이후 같은 해 9월 『재난 및 안전관리 기본법』 개정으로 국가 자연재난으로 지정되면서 위기관리 매뉴얼이 제정되었으며, 범정부부처와 17개 시도가 합동으로 폭염 종합대책을 수립하여 대응하고 있다(행정안전부 보도자료, 2018.7.24.; 2018.10.16.; 2020.5.15.). 미세먼지에 대해서는 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대해서 각각 2014년 2월, 2015년 1월부터 예보제가 실시되기 시작하였다. 2018년 3월 초미세먼지에 대한 환경기준을 강화하고 2019년 3월 미세먼지를 국가 사회재난으로 지정하면서 초미세먼지(PM_{2.5})에 대한 재난 위기관리 표준매뉴얼을 제정하는 등 정책적 대응 수준을 높여가고 있다(환경부 보도자료, 2018.3.21.; 2019.10.15.).

각각 자연재난과 사회재난으로 지정된 폭염과 미세먼지의 건강 영향을 줄이기 위해서는 노출 수준과 영향 정도에 대한 체계적인 이해가 필요하다. 재난 위험은 발생 가능성(probability)과 발생에 따른 영향(impact) 등 두 가지 차원에서 정량적으로 살펴볼 수 있으며 이를 통해 효과적으로 재난 관리를 수행할 수 있다(Dumbravă and Iacob, 2013).

최근 도입된 폭염과 미세먼지 관련 위기경보체계는 기존 예·경보체계를 통합한 체계로서 각 단계에 따라 국민을 대상으로 재난 위험의 심각 수준을 알린다는 점에서 중요한 정책 수단이라고 볼 수 있다. 향후 기후변화 등 환경문제 심화에 따라 그 역할이 더욱 높아질 것으로 기대된다. 하지만 기존 선행연구 경향을 살펴보면 폭염과 미세먼지 재난에 대한 건강 영향을 다루는 사례는 다수 존재하나, 국가 재난 위기경보시스템의 발령 기준에 초점을 둔 연구는 아직까지 부족하여 심도 있는 논의가 필요한 시점이다.

이 연구는 최근 국가 재난으로 지정된 폭염과 미세먼지에 대해 신설된 위기경보단계 기준과 과거 통계자료(2015년-2018년)를 활용하여 경보단계기준 적용 시 예상되는 발령일수와 기여사망 수준을 분석하여 현재의 위기경보단계 기준이 경고할 수 있는 재난위험이 어느 정도인지 정량적으로 파악한다. 특히 기존 선행연구와 다르게 경보단계별 기준 초과 여부를 지시변수로 활용하였다는 측면에서 의의가 있다. 이를 통해 현재 위기경보단계 기준에 대한 정책적 시사점과 개별 환경문제에 대한 효과적인 정책적 대응 방향을 모색하는 것을 주요 목적으로 한다.

II. 위기경보 기준 및 선행연구 고찰

1. 재난별 주요 기준 검토

위기경보체계는 국가가 재난 발생에 따른 위험을 대중들에게 사전에 충분히 알림으로써 재난 피해를 줄이는데 주요 목적이 있다(Casanueva et al., 2019). 대기오염 조기경보체계는 대기오염이 심할 것으로 예상될 때 오염물질 배출을 줄이고 대중에게 위험을 알리기 위해 운영된다(Xu et al., 2017). 이와 유사하게 폭염 조기경보체계는 취약계층과 일반 대중에게 고온 노출에 따른 위험을 제공하기 위해 가동된다(Toloo et al., 2013; Vaidyanathan et al., 2019).

위기경보체계 시행에 따른 건강 영향 저감효과는 여러 연구 사례에서 제시된 바 있다. Ebi et al.(2004)는 미국 필라델피아 지역의 폭염경보체계 운영으로 1995년-1998년 기간 동안 약 117명의 사망자를 줄일 수 있었으며 이를 통계적 생명가치(Value of a Statistical Life)로 추정된 결과 4억 6천 8백만달러 규모에 달한다고 보고하였다. 프랑스에서는 2003년 극심한 폭염 이후 열-건강 감시 경보체계(Heat Health Watch Warning System)를 구축하였는데, 1975년-2003년의 기온과 사망률 관계에 따라 2006년 폭염으로 6,452명의 초과사망자가 발생할 것으로 예측되었으나 실제 폭염경보체계 구축 이후 초과사망자는 2,065명으로 나타난 것으로 확인되었다(Fouillet et al., 2008). 일본 Goto에서의 실험에서는 폭염의 위험성을 전달 받은 고령자 그룹에서 그렇지 않은 그룹에 비해 폭염 회피 행동이 유의미하게 증가하는 것이 확인되었다(Takahashi et al., 2015). 따라서 위기경보체계와 그에 따른 대응정책이 사람들의 회피행동을 증가시켜 인명 피해를 줄이는 효과가 있을 가능성이 있다.

국내 폭염과 미세먼지에 대한 위험은 국가 예·경보 체계를 통해 상황 진단 및 전파가 이루어지고 있다. 폭염에 대한 대표적인 지표로는 폭염일수와 주의보/경보 일수 등이 있다. 폭염은 일 최고기온이 33℃인 경우를 의미하고 폭염이 발생한 날은 '폭염일수'로 정의되어 장·단기 기온 전망 관련 정책 지표로 활용되고 있다(환경부 보도자료, 2019.8.2.; 관계부처 합동, 2019a). 또한 폭염 위기 상황에 대한 대국민 전파 목적으로 활용되는 주의보와 경보는 각각 일 최고기온 33℃, 35℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때를 의미한다.

미세먼지에 대한 대표적인 지표는 대기환경기준과 예보, 주의보/경보 등이 있다. 『환경정책기본법』시행령에서는 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})에 대한 환경기준을 제시하고 있다. PM₁₀의 환경기준은 연간 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 24시간 평균치 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로, PM_{2.5}의 환경기준은 연간 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 24시간 평균치 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 지정되어있다(「환경정책기본법」시행령 별표 1). 특히 PM_{2.5}의 경우 2018년 대기환경기준의 연간 기준과

24시간 평균 기준 모두 강화된 조건으로 개정된 바 있으며, 이에 따라 PM_{2.5}의 예·경보 기준도 강화되었다(환경부 보도자료, 2018.3.21.).

최근 폭염과 미세먼지가 각각 자연재난과 사회재난으로 지정됨에 따라 국가 위기경보체계도 구성되었다. 위기경보 기준은 폭염 주의보/경보, 미세먼지 예보, 주의보/경보 기준을 조합하거나 더 강화된 수준으로 설정되어 있다(〈표 1〉 참조). 예를 들어 폭염 주의와 경계 단계는 각각 폭염 주의보(일최고기온 33℃ 이상 2일 지속), 폭염 경보(일최고기온 35℃ 이상 2일 지속) 기준에 1일씩 지속일을 추가한 조건이다.

PM₁₀의 관심 단계는 예보 “매우나쁨”기준(일평균 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과)이며, 주의 단계는 경보 단계 기준(시간당 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속)에 해당된다. PM_{2.5} 주의 단계는 경보단계 기준(시간당 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속)과 예보 “매우나쁨”기준(일평균 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과)이 조합되어 구성되어 있다. 이를 통해 재난별 위기경보단계 기준은 관심이나 주의 단계일지라도 기준 예·경보 수준 이상의 높은 위험을 포괄하는 것이라는 것을 알 수 있다. 또한 폭염과 미세먼지 간에 동일한 단계라도 각 재난별 해당 조건은 유사한 수준이 아닌 것을 확인할 수 있다. 폭염은 5월 20일부터 9월 30일 기간 동안 자동적으로 관심 단계가 발령된 것으로 간주되지만, PM₁₀과 PM_{2.5}는 예보 최고단계나 비상저감조치 기준이 해당될 경우에 발령되는 차이가 있다. 이와 유사하게 위기경보 ‘주의’단계의 경우 폭염은 주의보, PM₁₀과 PM_{2.5}는 경보 또는 그 이상 수준에 해당된다. 위기경보 ‘경계’단계에서 폭염은 경보 수준이라면, PM₁₀과 PM_{2.5}는 경보 보다 높은 수준이라고 볼 수 있다. 이러한 결과는 미세먼지가 상대적으로 강화된 기준을 넘어설 때에 비로소 대국민에게 위기 신호를 제공해준다는 점뿐만 아니라 상당한 위험(예보 ‘매우나쁨’ 등)임에도 불구하고 ‘관심’이나 ‘주의’단계라는 표현으로 위기 상황을 나타낸다는 점에서 혼란을 줄 수 있다는 문제가 있다.

〈표 1〉 폭염과 미세먼지의 위기경보단계 기준

단계	폭염	PM ₁₀	PM _{2.5}
관심	<ul style="list-style-type: none"> 폭염대책기간(5/20-9/30) 상시 발령 	<ul style="list-style-type: none"> 미세먼지 “매우나쁨 (일평균 PM₁₀ 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과)” 예보 시 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 발령기준: <ul style="list-style-type: none"> ① 당일(0-16시 평균) 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과, 다음날 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 예보 또는 ② 다음날 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 예보 또는 ③ PM_{2.5}주의보/경보 발령, 다음날 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 예보
주의	<ul style="list-style-type: none"> 일부 지역에서 일최고기온 33°C 이상, 3일 이상 지속 (주의보+1일) 	<ul style="list-style-type: none"> PM₁₀ 시간당 평균농도가 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속 (경보 수준) 	<ul style="list-style-type: none"> 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속 (경보 수준), 다음날 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 예보 (매우나쁨 수준) 관심 단계 2일 연속, 1일 지속 예상
경계	<ul style="list-style-type: none"> 지역적으로 일최고기온 33°C 이상, 3일 이상 지속 일부 지역에서 일최고기온 35°C 이상, 3일 이상 지속 	<ul style="list-style-type: none"> PM₁₀ 시간당 평균농도가 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속될 것으로 예상될 때 	<ul style="list-style-type: none"> 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속, 다음날 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 예보 주의 단계 2일 연속, 1일 지속 예상
심각	<ul style="list-style-type: none"> 지역적/광역적/전국적으로 일최고기온 35°C, 3일 이상 지속 일부 지역/지역적/광역적으로 일최고기온 38°C 이상, 3일 이상 지속 	<ul style="list-style-type: none"> PM₁₀ 1시간 평균농도가 2,400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 24시간 지속 후, 24시간 지속 예상 시 PM₁₀ 1시간 평균농도가 1,600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 24시간 지속 후, 48시간 지속 예상 시 	<ul style="list-style-type: none"> 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속, 다음날 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 예보 경계 단계 2일 연속, 1일 지속 예상
특징	<ul style="list-style-type: none"> 지역 범위 조건: 175개 특보 구역 - 일부 지역(10%), 지역적(40%), 광역적(60%), 전국적(80%) 일 지속조건 	<ul style="list-style-type: none"> 활용 변수: 일평균 농도, 시간당 농도 시간 지속조건 	<ul style="list-style-type: none"> 활용 변수: 일평균 농도, 시간당 농도 시간/일 지속조건

출처: 행정안전부(2019), 환경부 보도자료(2019.10.15)

지금까지 재난별 위기경보단계의 내용과 특징에 대해서 살펴보았다. 위 경보는 기존 예·경보 기준보다 강화된 수준이면서도 재난별로 각 단계가 동일하지 않은 수준으로 설계된 측면이 있었다. 그렇다면 이러한 차이가 경보 발령 빈도와 그 영향에 어떻게 반영되는지 알아보는 것을 통해서 위기경보 수준의 리스크를 정량적으로 파악하고 위기경보 기준을 진단하고자 한다.

2. 선행연구 고찰

1) 폭염의 건강 영향 관련 연구 동향

기온 분포와 발생률, 사망률 간의 관계는 U자형이나 V자형의 노출-반응 함수 형태 분포로 나타나며, 폭염 발생은 단기 노출로서 심혈관계, 호흡기계, 뇌혈관계 질환 발생과 심화에 유의한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Anderson and Bell, 2009; Ye et al., 2012).

폭염의 건강 영향 관련 연구들은 시점과 지역에 따라 역치 기온(threshold) 초과 시 노출-반응 함수(Exposure-Response Function)를 활용하여 상대적 위험(Relative Risk)과 건강 피해 규모를 추정하였다. 폭염에 의한 건강 영향 관련 연구는 질병 발생과 사망 영향 등으로 나눌 수 있다. 이나영·조용성(2015)은 전국 65세 이상 연령층의 호흡기계, 심혈관계 질환 관련 의료비용에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 연구 결과 열지수와 일최고기온이 높을수록 폭염에 따른 질병 비용이 증가하며, 그 외에 지역별 경제활동, 의료 인프라, 녹지 규모 등이 함께 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 황미경·김유근·오인보(2019)는 건강보험공단 보건의료빅데이터를 활용하여 2013년-2015년 여름 기간 동안 대도시별 일최고기온과 온열질환 발생 간의 관계를 분석하였다. 서울의 경우 임계온도가 33℃일 때 온열질환의 상대적 위험은 1.05로 나타났으며 65세 연령대로 한정할 경우 상대적 위험은 1.28로 확인되었다.

한편 보다 많은 연구들은 폭염의 사망 영향에 주목해왔다. Kysely and Kim(2009)은 1991년부터 2005년까지 연도별로 국내 폭염에 따른 초과사망자 수를 추정하여 1994년 폭염으로 인한 초과사망자가 3,384명에 이른다고 제시하였다. 김지영 등(2009)은 지역간 임계기온의 차이에 주목하여 지역별 기후순응도를 분석하였다. 이 연구에서는 1991년에서 2005년까지의 사망원인통계와 일최고기온 자료를 활용하여 대도시별 초과사망자 규모가 계산되었으며, 인천과 서울 등 수도권 거주민들의 폭염에 상대적으로 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

기후 조건이 다른 지역간 비교를 시도한 연구도 있었다. Chung et al.(2009)은 체감온도 지표를 활용하여 서울을 포함한 동아시아 4개 도시를 대상으로 폭염의 사망 영향을 분석하였다. 모든 사망원인을 기준으로 할 때 서울은 다른 지역과 다르게 J자 곡선 형태의 체감온도-초과사망 합수를 가지면서 여름철 기준 체감온도 1℃ 상승은 사망 위험을 3.4%(임계온도 33.1℃) 증가시키는 것으로 나타났는데, 이는 도쿄(2.0%, 임계온도 31.5℃)보다 높고 타이베이(5.1%, 임계온도 31.5℃)보다 낮은 수준인 것으로 확인되었다. 다만 분석에 활용된 자료들의 시점이 각 도시별로 다르다는 점에서 결과 비교에 한계점이 있다.

양지훈·하종식(2013)과 배현주 등(2017)은 기후변화 사회경제 시나리오인 온실가스 대표농도 경로(Representative Concentration Pathways, RCP)에 따라 기온 상승에 따른 사망 영향 규모를 분석하였다. 양지훈·하종식(2013)은 서울 지역을 대상으로 2001년-2010년까지의 일평균기온과 일별사망자수의 노출-반응 계수를 도출하여, 이를 2011년-2040년 기간의 RCP 시나리오별로 적용하였다. 배현주 등(2017)은 폭염 발생 수준과 건강 영향에 대하여 분석하였다. 발생 수준에 대해서는 1980년에서 2015년까지의 일평균기온 상위 10% 지점을 역치값으로 적용하여 역치값 이상인 경우의 폭염일수를 계산하였다. 영향에 대해서는 1992년에서 2015년까지의 체감온도를 활용한 사망 영향을 분석하고 나아가 2020년-2100년까지 RCP시나리오별 초과사망자 수를 추정하였다.

보다 최근 시점에 대한 연구 사례인 박종철·채여라(2020)은 우리나라 35개 기후지역에 대하여 2018년 폭염에 의한 온열질환자와 초과사망자 등의 건강 피해를 분석하였다. 지역별로 다른 임계기온을 고려하여 추정된 초과사망자 규모는 수도권 지역에서 상대적으로 높은 편이었으나 초과사망률은 비대도시권지역에서 높게 나타나는 점이 확인되었다.

한편 이러한 건강 영향 추정에 있어서 역치 기온과 더불어 특정 기준을 계산에 활용한 연구도 있다. 임연희·이현지·홍윤철(2019)은 2006년에서 2018년까지 국내 폭염으로 인한 초과사망자 수를 추정하면서 일반적인

건강영향 함수에 폭염일 지시변수를 추가하여 초과사망자 규모를 추정하였다. 이 방법은 온도가 일정 기준을 초과한 경우에 한정하여 기준 초과 시 재해의 기여사망 규모를 계산할 수 있는 장점을 가진다.

2) 미세먼지의 건강 영향 관련 연구 동향

미세먼지 건강 영향 연구에서도 미세먼지 농도와 건강영향 관계와 농도-반응 함수(Concentration-Response Function)의 도출 및 이를 활용한 사망자 규모 추산 등의 분석이 이루어졌다. 미세먼지와 오존 등 대기오염은 호흡기계, 심혈관계, 폐암 등 비전염성 질병 발생 및 사망에 영향을 미치며, 2015년 장기 노출로 인하여 전세계적으로 약 880만명의 초과사망자 발생, 2.9년의 기대여명 손실이 나타난 것으로 보고되었다(Lelieveld et al., 2020). 미세먼지는 단기 노출만으로도 사망률 증가에 큰 영향을 미치는데 PM₁₀과 PM_{2.5}의 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가당 각각 모든 원인 사망 0.44%, 0.68% 증가로 이어지는 것으로 제시되고 있다(Liu et al., 2019).

국내에서도 미세먼지의 건강영향에 대하여 많은 연구가 수행되었다. 최종일·이영수(2015)는 PM_{2.5} 배출량과 호흡기계 질환 관련 내원률과 입원률을 토빗 모형으로 분석하여 PM_{2.5} 배출량 1% 증가 시 내원률은 약 1.2%, 입원률은 약 0.2% 증가하며, 배출량 1t당 호흡기계 질환에 따른 내원 및 입원환자가 각각 약 812.1명, 131.6명씩 늘어난다고 제시하였다. 김수인·원두환(2018)에 따르면 전년도 PM₁₀ 농도가 10% 증가하는 경우 심혈관계 질환 관련 조기사망률은 약 2.9% 증가하며, PM₁₀ 농도를 10% 저감시킬 경우 조기사망률 감소로 평균 2,795억원의 사회적 편익을 얻을 수 있는 것으로 제시되었다.

다수 연구들은 미세먼지 농도와 건강 영향 간의 함수 관계를 바탕으로 건강 영향 규모를 추정하였다(공성용 등, 2013; 배현주, 2014; 안소은 등, 2017; 하종식·문난경, 2013; 하종식 등, 2016). 하종식 등(2016)은 미세먼지와 오존에 대한 장·단기 노출에 따른 농도-반응 함수 국내 표준안을 메타분석을 통해 도출하고, 이를 이용하여 수도권 지역의 사망 영향을 분석

하였다. 본 연구에서는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 건강 영향을 분석하는 데 있어서 하종식 등(2016)의 메타분석 결과로 도출된 농도-반응 함수를 활용하였다.

하종식·문난경(2013)은 2005년-2010년 수도권 지역을 대상으로 농도-반응 함수를 도출하여 초과사망자 수를 추정하였다. 이 연구에서는 역치 수준을 $0 \mu g/m^3$ 로 가정하였는데, 이러한 계산 과정은 농도 한 단위의 건강 영향이 동일하다는 전제를 포함하기에 기여사망을 과대하게 추정할 수 있는 불확실성이 있다고 제시하였다(하종식·문난경, 2013).

일부 연구들은 건강 영향 분석에 있어서 국가 기준이나 WHO 권고기준을 활용하였다. 배현주(2014)는 서울시를 대상으로 미세먼지 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 대기환경기준 초과일수에 대한 노출 수준을 제시하였다. 공성용 등(2013)과 안소은 등(2017)은 건강 영향 분석에 농도 역치수준을 WHO 권고기준으로 설정하여 정책 대안 달성 시 심혈관계 및 호흡기계 입원건수 또는 초과사망자의 감소 수준을 제시하였다. 이러한 특정 기준을 이용하여 피해규모를 계산하는 방식은 해당 정책 기준에 대한 참고자료를 제공한다는 점에서 정책적 활용도가 높다고 할 수 있다.

3) 기존 선행연구와의 차별점

폭염과 미세먼지의 건강 영향 관련 연구 동향을 살펴본 결과, 대체로 일정 지역 범위를 바탕으로 노출 수준과 질병, 사망 등 건강 지표 간의 관계를 규명하는 경우와 질환자 및 사망자 규모, 건강 비용 등을 추정하여 공간적, 시간적 비교를 시도하는 경우로 정리해볼 수 있었다. 한편, 기존 미세먼지 연구 동향에서 건강 영향 분석 시 WHO 권고 기준을 활용하여 정책 목표 달성 시 사망자 감소 수준에 대해서 보고되고 있으나, 국내 예·경보 또는 국가위기경보 기준 초과 시 사망 영향에 대한 분석은 부족한 편이다. 이 연구는 폭염과 미세먼지 재난에 대한 피해규모를 건강 영향을 중심으로 분석 하되, 기존 선행연구와 달리 국가 위기경보단계 기준 초과 여부를 바탕으로 재난 발생 수준과 영향 정도를 분석한다는 점에서 차별성을 가진다. 이를 통해 효과적인 국가 재난 관리를 위한 정책적 시사점을 도출하고자 한다.

III. 연구 방법

1. 지역별 미세먼지 농도와 여름철 기온 자료

본 연구에서는 2015-2018년의 서울시 기상자료는 서울시 자치구별 일 평균 미세먼지 농도와 일최고기온 자료를 이용하였다. 일최고기온 자료는 양호진 등(2019)이 생산한 1 km 공간해상도 단위의 기상자료이다. 양호진 등(2019)은 기상청의 5 km 공간해상도 동네예보 자료를 Gaussian Process Regression Model(GPRM)을 활용하여 1km 단위로 내삽하였다. GPRM에는 고도와 해안선과의 거리, 방향 등 지형 변수와 불투수 면적과 식생 현황, 밀도 등 지표면 변수가 활용되었다. 잭나이프 방식의 모델 평가에서 GPRM의 평균 RMSE는 1.17°C로 나타나 Co-kriging의 1.2°C와 IDW의 1.3°C에 비해 모의 정확도가 높은 것으로 확인되었다. Co-kriging에서 활용된 부변수는 지형고도이다.

미세먼지 농도는 한국환경공단의 Air Korea에서 제공하는 지점 관측 자료를 Co-kriging으로 1km의 정규 격자 형태로 내삽한 자료로부터 획득하였다. Co-kriging에서 부변수로는 지형고도를 이용하였다. Co-kriging의 결과에 대한 PM₁₀의 Kling and Gupta Efficiency(KGE)는 0.58이었으며, PM_{2.5}의 KGE는 0.59이었다. 대체로 KGE는 미세먼지 농도가 낮은 8~9월에 낮게 나타났다. RMSE는 PM₁₀에서 평균 8.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, PM_{2.5}는 7.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

2. 노출-반응 함수

온도-반응 함수는 R의 mgcv 패키지를 이용하여 일반화 부가 모형(General Additive Model, GAM)으로 도출하였다(식 1)). 분석 기간은 2011년부터 2018년까지에서 6월-8월의 기간이며, 사망 자료는 통계청의 지역별 사망원인통계에서 제공되는 한국표준질병사인분류 부호 A부터 R까지의 외인사 외 모든 사망 자료를 활용하였다.

$$\ln[E(Y)] = \beta_0 + offset(\log(pop)) + s(tmax) + s(doy) + s(sn, k = 2 * 7) + f(holiday) + \varepsilon \quad (1)$$

여기에서 $E(Y)$ 는 기대되는 일별사망자 수를 의미한다. s 는 smoothing parameter이고 factor는 범주형 변수이다. pop 는 각 구의 인구이고, $tmax$ 는 일 최고기온이며 doy 는 줄리안 데이 또는 day of year이다. sn 은 일자의 일련번호이며, $holiday$ 는 요일 구분으로 본 연구에서는 평일, 휴일, 휴일 다음날을 사용하였다. GAM은 환경보건 분야에서 기상이 사망에 미치는 영향을 분석하기 위해 널리 활용되고 있는 모형이다(Gasparrini et al., 2015). 식 (1)은 인구 변화 등으로 인한 사망자수 변화의 장기 추세, 계절적 요인에 의한 사망자 수 변화, 요일에 의한 사망자 수 변화를 고려했을 때 기온에 의한 사망자 수 변화를 분석하도록 설계되었다. sn 은 장기 추세, doy 는 계절적 요인, $holiday$ 는 요일에 의한 차이를 고려하기 위한 변수이다. pop 은 각 구의 인구 규모에 따른 사망자 수의 차이를 고려하기 위한 변수이다.

미세먼지 농도-반응 함수는 하종식 등(2016)에서 개발된 함수를 활용하였다. 하종식 등(2016)은 대기오염의 건강 영향 관련 문헌으로 메타 분석을 실시하여 국내 농도-반응 (Concentration-Response, CR)함수 표준안을 제시하였다. 도출된 CR함수는 PM_{10} , $PM_{2.5}$, 오존 등 대기오염물질과 장·단기 노출 특성, 사망과 입원 등 건강 영향에 따라 제시되었다. 본 연구에서는 이 중에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 단기노출 사망에 대한 농도-반응 함수(PM_{10} : 0.000297, $PM_{2.5}$: 0.000302)를 활용하였다.

3. 재난별 위기경보기준 발령일과 기여사망자 산출

폭염과 미세먼지의 위기경보 기준 발령일은 각 단계별 발령조건을 참고하여 계산하였다. 폭염 위기경보단계는 전국 175개 특보구역의 지역 범위를 바탕으로 발령되지만, 이 연구의 공간적 범위가 서울시 25개 자치구이므로 지역 범위 조건을 특보구역이 아닌 25개구에 적용하여 발령일을 계

산하였다. 미세먼지 위기경보단계의 경우 시간당 농도 자료와 일평균 농도 자료가 모두 필요하지만, 모든 시간당 농도자료를 보간법으로 구축하기에 한계가 있어 미세먼지 단계별 발령일 계산 시 보간 자료가 아닌 Air Korea 관측소 지점별 시간당 농도 자료를 활용하였다.

위기경보는 전국 또는 시도 범위에서 동일하게 발령하기 때문에 분석과정에서도 1월 1일부터 12월 31일까지 25개 자치구 모두 위기경보단계 발령 여부를 동일하게 적용하였다.

기온 노출 또는 대기오염에 따른 미세먼지 농도 증가에 따라 건강에 부정적인 영향이 나타날 수 있으며, 기여사망(attributable death)은 이러한 고온이나 오염 물질이 기여한 사망을 의미한다(양지훈·하중식, 2013; Brauer et al., 2012; Gasparrini et al., 2015; Lelieveld et al., 2020).미세먼지와 폭염에 의한 서울시 연간 기여사망자수를 추정하기 위하여 기존 선행연구에서 제시한 기여사망자 추정 공식을 검토하였다(양지훈·하중식, 2013; 하중식 등, 2016; 임연희 등, 2019). 그 결과 다음 식 (2)와 같이 서울시 25개구별로 일별 기여사망자 추정치를 누적하여 연간 기여사망자수를 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{경보단계별 서울시 기여사망자수} & (2) \\ & = \sum_{j=1}^N [1 - (1/\exp(\beta \times \Delta E_{ij}))] \times I \times P \times Day_{sig} \end{aligned}$$

식 (2)에서 β 는 폭염의 경우 고온에 따른 사망 영향, 미세먼지의 경우 농도에 따른 사망 영향을 의미하는 노출-반응 계수를 의미한다. 앞서 제시한 바와 같이 기여 사망자 계산에 활용되는 노출-반응 계수는 폭염의 경우 일반화부가모형 분석 결과를, 미세먼지의 경우 하중식 등(2016)의 국내 표준안을 활용한다.

노출(Exposure) 수준을 의미하는 ΔE_{ij} 는 I지역의 j일의 미세먼지 오염 농도 또는 임계기온과 일최고기온의 차이값이며, 미세먼지는 연간, 폭염은 6월부터 8월까지로 한정하여 산출하였다.¹⁾ 폭염에 의한 기여사망자는

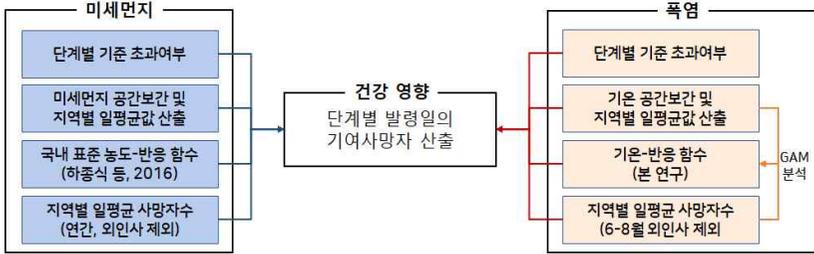
해당 일의 기온과 임계온도값(기준 값) 사이의 초과값을 ΔQ 로 설정하여 계산하였다(양지훈·하종식, 2013; 임연희 등, 2019). 반면에 미세먼지 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 계산에 있어서는 농도-반응 함수의 특성을 고려하여 역치 수준이 존재하지 않는다고 가정하여 ΔQ 산정 시 기준 값을 $0 \mu g/m^3$ 으로 정의하였다(하종식·문난경, 2013).

Day_{sig} 는 임연희 등(2019)의 초과사망자 산출 계산 방법에서 제시된 것과 유사하게 미세먼지와 폭염의 국가 위기경보단계 기준 발령일을 나타내는 지시변수이다. 앞서 산출된 발령일 정보를 바탕으로 발령일에 해당하는 날은 1, 그렇지 않으면 0으로 설정하여 각 기준 발령일의 기여 사망규모를 확인하였다. I와 P는 각각 지역별 사망자 발생률과 주민등록연앙인구수로서 사망 발생 수준을 의미한다. 기여사망 계산시 각 단계 발령일의 기여사망자를 누적하여 계산하였기 때문에 사망자 발생률은 일평균값을 활용하였다.

이상의 논의를 바탕으로 각 재난의 위기경보단계별 건강 영향 산출 과정 과정을 정리하면 다음 <그림 1>과 같다. 1차적으로 미세먼지와 기온의 지역별 일별 농도/온도 값, 노출-반응 계수, 지역별 사망자수 자료를 확보한다. 이러한 1차 자료들을 바탕으로 각 재난에 따라 단계별로 경보기준 초과여부를 파악하고, 이를 누적하여 연간 경보 기준 초과일 수를 계산하였다. 기여사망 규모는 일별 농도/온도값과 경보단계 기준 초과여부를 반영하여 일별 기여사망 수준을 계산하고 이를 누적하여 연간 기여사망 규모를 산출하였다.

1) 폭염 관심단계 기간(5/20-9/30)과 건강영향 분석 범위(6-8월)가 다르지만, 5월과 9월에 임계기온이 넘는 경우가 없기 때문에 그대로 분석을 진행하였다.

〈그림 1〉 건강 영향 분석의 흐름도

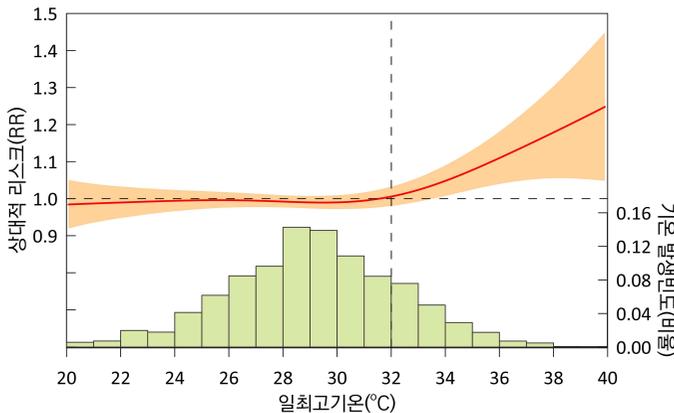


IV. 분석 결과

1. 노출-반응 계수와 기술통계

기온 노출에 의한 건강 영향에 대하여 파악하기 위하여 2011년에서 2018년 하절기(6월-8월) 동안 비선형 포아송 회귀모형을 적용하여 분석한 결과 일최고기온 32°C를 기점으로 사망위험이 크게 높아지는 것을 확인할 수 있었다(〈그림 2〉 참조).

〈그림 2〉 서울시 일최고기온과 일별 사망간의 노출-반응 곡선



*주: 그래프 우측 하단의 '기온'은 일최고기온을 의미함

일최고기온 32℃는 분석기간의 일최고기온의 81퍼센타일 지점에 위치하는 것으로 나타났다. 일최고기온 32℃의 상대 위험(Relative Risk)는 1.031(95% 신뢰구간: 1.008-1.054)²⁾로 확인되었다. 이는 32℃ 초과 이후 기온이 1℃ 증가할 때 사망 위험이 3.1% 증가하는 것을 의미한다. Gasparrini et al.(2015)은 우리나라 일평균기온이 약 25℃를 기점으로 사망률이 증가한다고 보고하였으며, Chung et al.(2009)은 임계온도 33.1℃ 조건에서 사망위험이 1℃당 3.4%씩 증가한다고 제시하였다. Heo et al.(2016)에서 서울을 포함한 지역 군집이 최고기온 33.5℃를 기점으로 상대적 위험(RR)이 1996년-2000년의 경우 1.07, 2008년-2012년 1.10으로 확인되었다. 임계기온이 높게 설정될수록 상대적 위험(RR)이 높아질 수 있기 때문에 본 연구의 분석 결과로 산출된 노출-반응 계수가 적절하다고 판단하였다. 분석에 활용한 노출-반응 계수는 다음 <표 2>에 제시되어 있다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 노출-반응 계수는 앞서 제시한 바와 같이 하종식 등(2016)이 개발한 국내 표준안 결과를 활용하였다.

<표 2> 재난 유형별 단기 노출-반응 계수

재난 유형	노출 특성	인구집단	노출-반응함수	표준오차	출처
PM ₁₀	단기	전연령	0.000297	0.000047	하종식 등(2016)
PM _{2.5}	단기	전연령	0.000302	0.000009	하종식 등(2016)
폭염	단기	전연령	0.030356*	0.011735	본 연구

*임계기온: 32℃

기여사망자 분석에서는 노출-반응 계수 외에도 농도 또는 온도, 인구와 사망 수준 등의 변수들이 함께 필요하다. <표 3>에는 2015년에서 2018년 까지의 서울시 자치구별 주요 변수에 대한 기술통계가 제시되어 있다.

2) 95% 신뢰구간이 모두 1을 넘으면 기온 상승에 의한 사망자 증가가 통계적으로 유의하다는 것을 의미한다.

〈표 3〉 서울시 25개구 평균 주요 변수별 기술통계

25개구 평균	2015년	2016년	2017년	2018년
연간 PM ₁₀ 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	46.54 (2.37)	49.48 (2.86)	44.22 (1.94)	41.17 (1.66)
연간 PM _{2.5} 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	22.46 (1.18)	25.42 (0.69)	24.03 (0.50)	22.85 (0.87)
여름철 일최고기온($^{\circ}\text{C}$)	29.1 (0.20)	29.46 (0.19)	28.62 (0.20)	30.51 (0.16)
10만명당 연간 사망률	405.9 (66.4)	413.3 (65.7)	413.5 (66.3)	440.8 (73.5)
10만명당 여름철 사망률	95.8 (16.8)	96.9 (16.3)	97.5 (16.7)	105.0 (18.3)
주민등록연앙인구(명)	396,286.2 (132,313.9)	392,441.5 (131,392.6)	388,976.0 (130,282.1)	385,714.3 (128,908.3)

*주: 농도/온도 값은 일별 자료의 기간별 평균값이며, 괄호 속 숫자는 25개구의 표준편차임

해당 기간 동안 연평균 PM₁₀과 PM_{2.5}의 구별 평균값의 분포는 각각 41.2-49.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 22.5-25.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 2016년이 가장 농도가 높고, 이후 점차 감소하는 경향을 보인다. 한편 여름철(6-8월)기간 일최고기온 평균값은 29.4 $^{\circ}\text{C}$ 이며, 2017년의 경우 28.6 $^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮으며 2018년 30.5 $^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높았다. 서울시 인구는 점차 감소하고 있으나 외인사 제외 모든 사망원인의 10만명당 연간 사망률과 여름철 사망률은 점진적으로 증가하고 있다.

2. 위기경보단계 초과 빈도와 영향

2015년-2018년 서울시 25개구의 일별 농도/온도를 바탕으로 일별 경보 기준 초과 여부와 연간 경보단계 초과일수를 도출하였다. PM₁₀, PM_{2.5}는 경계와 심각단계를 초과하는 경우는 없는 것으로 나타났으며 관심과 주의단계 발령일수도 폭염과 상당한 차이가 있는 것으로 확인되었다. 폭염의 경우 5/20-9/30 기간 중에서 상위 단계가 발령되지 않는 경우 항상 관심 단계에 해당되기 때문에 모든 연도가 관심 단계에 해당하는 날이 100일 이상인 것으로 확인되었다. 또한 폭염 주의단계 발령일은 다른 발

령일에 비하여 가장 적게 나타났으며 2016년에만 발생한 것으로 확인되었다.

〈표 4〉 재난별 위기경보단계별 발령일 추세(서울시)

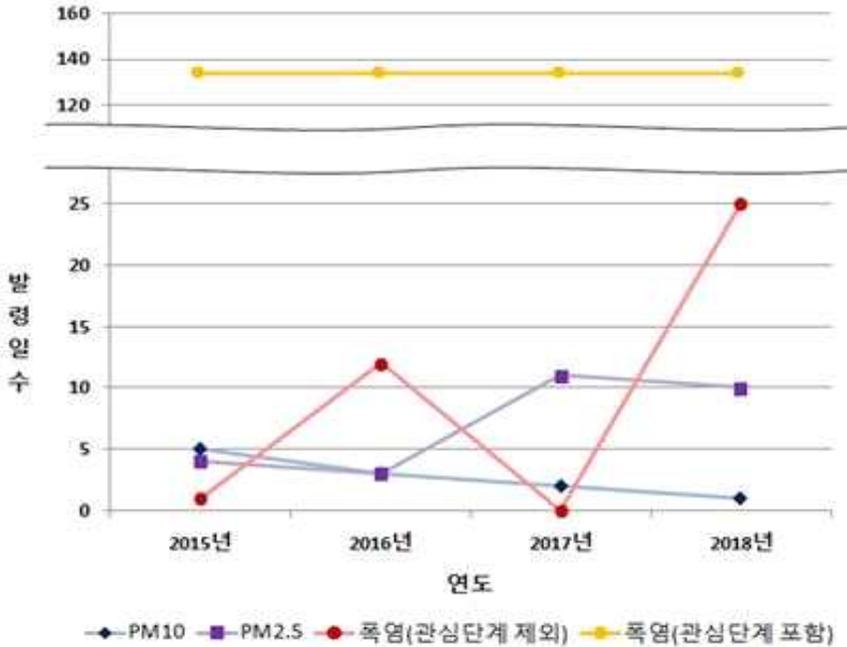
단위: 일

재난	위기경보단계	2015년	2016년	2017년	2018년	'15-'18 합계
PM ₁₀	관심	3	1	2	0	6
	주의	2	2	0	1	5
	경계	0	0	0	0	0
	심각	0	0	0	0	0
	발령일 합계	5	3	2	1	11
PM _{2.5}	관심	4	3	10	7	24
	주의	0	0	1	3	4
	경계	0	0	0	0	0
	심각	0	0	0	0	0
	발령일 합계	4	3	11	10	28
폭염	관심	133	122	134	109	498
	주의	0	3	0	0	3
	경계	1	9	0	21	31
	심각	0	0	0	4	4
	발령일 합계 (관심단계 제외)*	134(1)	134(12)	134(0)	134(25)	536(38)

*폭염 발령일 합계 중 괄호 내 숫자는 5/20-9/30 기간 자동 발령되는 관심단계 제외일 수

폭염에 비하여 미세먼지 위기경보 발령일이 상대적으로 적은 편이지만, 그 자체로 일정기간 지속되는 고농도 발생일이므로 그 추세에 대하여 주의깊게 살펴볼 필요가 있다(〈그림 3〉 참조). PM₁₀의 경우 위기경보 기준 발령일이 2015년 5일에서 2018년 1일로 감소 추세에 있는 반면, PM_{2.5}는 2015년 4일에서 2018년 10일로 증가 추세를 보이고 있는 것을 확인할 수 있고, 관심단계와 주의단계 발령일이 함께 늘어나는 것을 볼 수 있다. 폭염은 폭염대책기간 동안 자동 발령되는 관심단계를 포함하면 총 발령일이 매년 134일로 나타나 미세먼지와 큰 차이를 보였다. 관심단계를 제외하고 살펴보면, 2015년이나 2017년에 비하여 2016년 12일, 2018년 25일로 연도별 편차가 심한 편인 것을 알 수 있다.

〈그림 3〉 재난별 연도별 총 관심단계 이상 발령일 추세



위기경보기준 발령일의 기여사망자수는 발령 여부와 함께 해당일의 농도 또는 기온에 따라 그 규모가 추산된다. 같은 단계 발령일이라도 농도나 기온값은 발령일마다 다를 수 있기 때문이다. <표 5>는 각 재난별 위기경보단계별 기여사망자 규모를 제시하고 있으며 단계별 위계에 따라 건강 영향을 해석할 수 있다. 예를 들어, 2015년-2018년 서울시를 기준으로 PM₁₀ 관심단계를 초과한 경우 13.5명의 기여사망자가 발생하였으며, 그 상위 단계인 주의단계를 초과하게 되면 38.6명이 추가로 사망하는 것으로 볼 수 있다. 폭염은 2018년 6-8월 307.5명(관심단계 포함)의 기여사망자를 발생시키는 데 영향을 준 것으로 나타났다. 이는 박종철·채여라(2020)의 2018년 폭염 사망자 규모인 325명(95% CI: 272명-383명)와 유사한 수준이다. 관심단계를 제외하더라도 2018년 위기경보발령일에 255.9명의 기여사망 수준을 보였다.

〈표 5〉 재난별 단계별 발령일의 기여사망자수 추세(서울시)

단위: 명

재난	위기경보단계	2015년	2016년	2017년	2018년	'15-'18 합계
PM ₁₀	관심	6.2	2.6	4.7	0	13.5
	주의	23.7	10.8	0	4.1	38.6
	경계	0	0	0	0	0
	심각	0	0	0	0	0
	기여사망자 합계	29.9	13.4	4.7	4.1	52.1
PM _{2.5}	관심	7.0	6.0	19.6	14.8	47.4
	주의	0	0	2.1	8.5	10.6
	경계	0	0	0	0	0
	심각	0	0	0	0	0
	기여사망자 합계	7	6	21.7	23.3	58
폭염	관심	29.7	46.2	36.9	51.6	164.4
	주의	0	10.5	0	0	10.5
	경계	2.9	54.4	0	189.4	246.7
	심각	0	0	0	66.5	66.5
	기여사망자 합계 (관심단계 제외)*	32.6 (2.9)	111.1 (64.9)	36.9 (0)	307.5 (255.9)	488.1 (323.7)

*폭염 기여사망자 합계 중 괄호 내 숫자는 관심 단계 이외 기여사망자 수

재난별 연도별 기여사망자수 추세는 발령일 변화 추세와 유사하게 나타났다. PM₁₀은 감소 경향을, PM_{2.5}는 증가 경향을 보였으며, 폭염은 연도별로 증감을 반복하는 것으로 확인되었다(〈그림 4〉 참조).

〈그림 4〉 재난별 연도별 총 관심단계 이상 발령일의 기여사망자수 추세

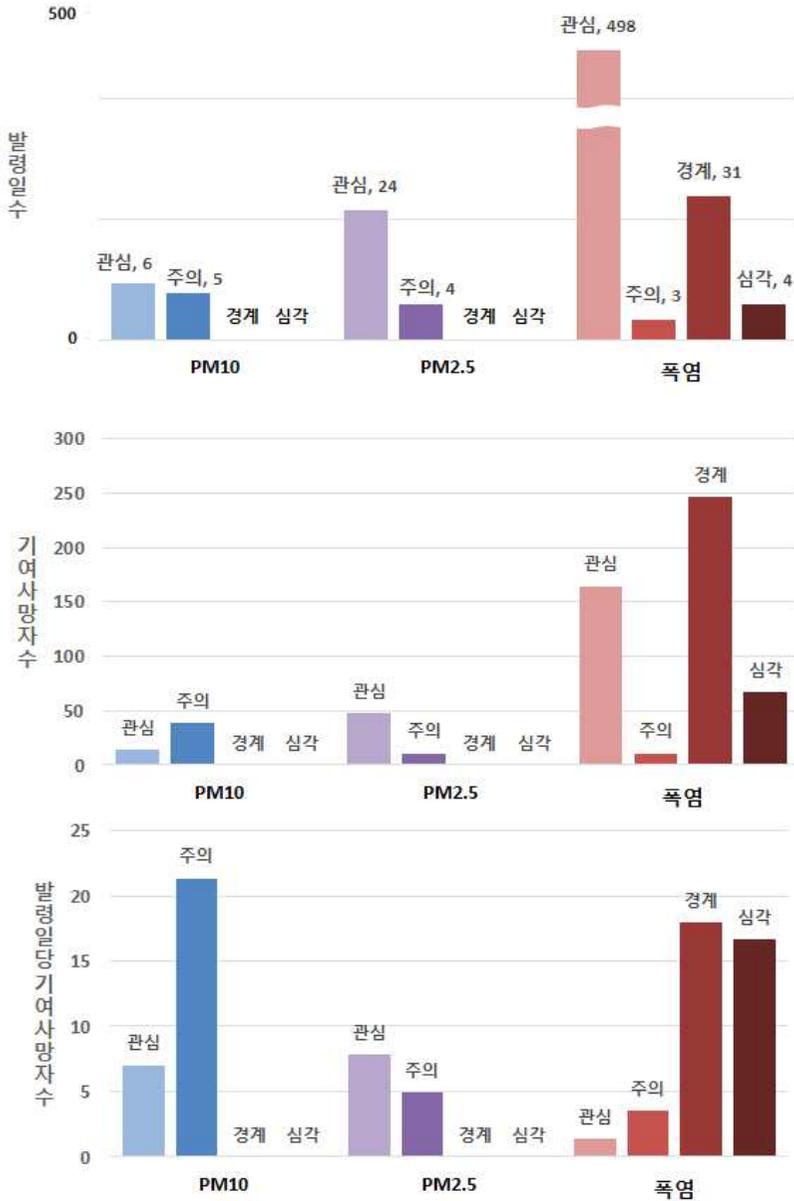


V. 토의

1. 재난별 위기경보단계의 개선방안

연구 결과 위기경보단계 구성에 있어 재난별로 다소 이질적인 경향이 확인되었다. 〈그림 5〉는 서울시 25개구에 대하여 2015년-2018년 동안 각 재난별로 경보단계별 발령일수와 기여사망자수, 발령일 1일당 기여사망자수를 누적 합산한 값들을 나타낸 그래프이다. 발령일수부터 보면 폭염은 매년 5월 20일부터 9월 30일 동안 관심단계가 상시 발령되기 때문에 발령일수가 압도적으로 높은 편으로 나타나 PM₁₀과 PM_{2.5}의 관심단계 발령일수와 큰 차이가 있었다. 또한 PM₁₀과 PM_{2.5}의 경우 경계와 심각단계가 발령되지 않는 것으로 나타나 폭염의 경우와 상당히 대조적으로 나타났다.

〈그림 5〉 재난별 경보단계별 발령빈도 및 건강영향 규모 비교(2015-2018년 누적)



* 주: 발령일당 기여사망자수는 각 연도 내 단계별 기여사망자수를 발령일로 나눈 값을 연도별로 누적 합산한 결과임

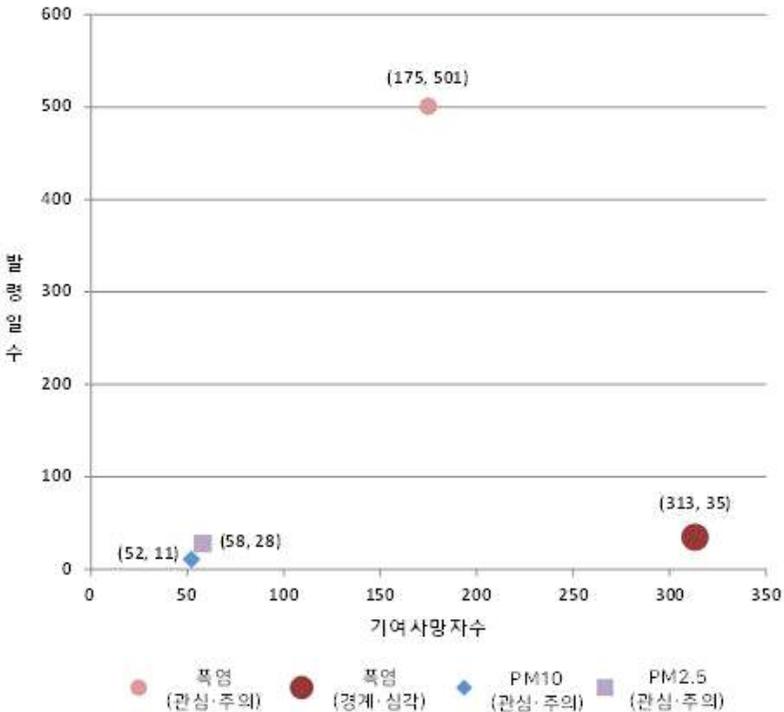
기여사망자수의 경우 폭염 경계단계 발령일의 기여사망자수가 약 250명에 달하는 것으로 나타나 모든 재난별 경계단계 발령일 중 가장 많은 것으로 확인되었고, 폭염 심각단계 발령일의 기여사망 규모도 66.5명으로 나타났다. 다음으로 경보단계별 발령일 1일당 기여사망자수를 살펴보면, PM₁₀ 주의단계가 1일 발령하였을 때 기여사망자가 21명 이상 발생한 것으로 나타나 같은 1일이라도 더 큰 위험을 경고하는 수준으로 나타났다. 또한 PM₁₀과 PM_{2.5}의 관심 및 주의단계 발령일 하루당 기여사망 규모는 폭염의 관심 및 주의단계 발령일당 사망자수보다 많게 산출되었다.

이러한 결과를 종합하여 보면, 전반적으로 폭염에 비하여 미세먼지의 단계 기준이 상대적으로 높게 설정된 것으로 볼 수 있다. 앞서 논의한 바와 같이 폭염의 주의단계가 폭염주의보 수준에 1일을 지속하는 조건으로 구성되어 있다면, PM₁₀과 PM_{2.5}는 각각의 경보 수준이거나 경보와 매우나쁨 예보 수준을 결합한 조건으로 구성되어 있다. 이는 같은 국가재난임에도 불구하고 형평성 있게 위기관리가 수행되지 못할 수 있음을 의미한다. 현재 PM₁₀이나 PM_{2.5}의 관심단계나 주의단계 발령일 1일당 기여사망자수를 살펴보면, '주의' 단계임에도 불구하고 1일이라도 발령될 경우 상당한 건강 피해를 가져올 수 있음을 보여준다. 이는 미세먼지 재난 관리에 있어 크게 두 가지 시사점으로 파악해볼 수 있다. 첫 번째는 위험 경보단계 발령 수의 문제이다. 미세먼지 경계와 심각단계가 실질적으로 위험 경고를 제공하지 못하는 것은 형식상 4단계로 구성된 경보단계가 실제로는 2단계로 기능하면서 충분한 위험 대비를 하지 못하게 만들 수 있다. 두 번째는 발령되는 위기경보단계 명칭의 문제이다. 현재 미세먼지 관심과 주의 단계 기준이 비상저감조치 또는 예보 매우나쁨, 경보 수준에 해당할 정도로 매우 심각한 고농도 조건 등 위험이 실제로 매우 심각함에도 불구하고, 위기경보가 '경계'나 '심각' 단계로 발령되지 않아 대중들로 하여금 위기경보의 위험 경고가 충분히 위험을 인지하지 못하게 할 수 있다.

〈그림 6〉은 폭염과 미세먼지의 관심과 주의, 경계와 심각단계의 발령일과 기여사망자 규모 분포를 비교한 그래프이다. 미세먼지는 경계와 심각

단계 발령일이 산출되지 않아 계산할 수 없었다. 각 재난별 경보단계의 기여사망자 규모는 해당 경보단계 발령으로 인하여 대중들에게 경고할 수 있는 사망 위험 수준을 의미한다고 볼 수 있다. 2015년-2018년 서울시를 기준으로 폭염은 관심과 주의단계를 501일 발령하여 175명 수준의 기여 사망 위험을 경고할 수 있는 것으로 나타났다. 이에 비하여 PM₁₀이나 PM_{2.5}의 관심과 주의단계는 발령 횟수가 적어 사망 위험을 그만큼 적게 경고한다고 볼 수 있다. <그림 6> 그래프 우측 하단에 자리잡은 폭염 경계 및 심각 단계는 적은 발령일에도 상당히 많은 사망위험을 경고하는 수준으로 나타났는데 미세먼지의 경우도 이러한 측면에서 검토가 필요할 것으로 보인다.

<그림 6> 재난별 경보 발령일과 기여사망자 규모(2015-2018년 누적)



*주: 그래프 속 괄호 내 숫자는 기여사망자수, 발령일수를 의미함(기여사망자수, 발령일수)

종합해서 보면 미세먼지와 폭염의 위기경보단계 기준으로 고려할 때 단계별 기준을 유사한 수준으로 설정하여 재난 관리의 효과성을 높여나갈 필요가 있다. 예를 들어 관심 단계의 경우 폭염과 같이 겨울철 고농도 발생기간으로 상시 발령하는 형태로 구성하는 방안도 고려해볼 필요가 있다. 또한 나머지 경보 단계 조건도 검토 과정을 통해 위험이 적절히 경고될 수 있도록 재편할 필요가 있다.

한편 폭염의 경보단계의 경우 현재 고려되고 있는 기온 지표 외에 체감 온도를 고려하거나 사회·경제적 영향 수준에 근거한 임계지점 설정하는 방안을 고려해볼 수 있다. 최근 기상청에서는 단순히 기온 정보에 근거하여 폭염 상황에 대한 특보를 제공하는 데에서 나아가 주요 분야별로 관심, 주의, 경고, 위험 등 4단계에 따라 폭염의 사회·경제적 피해 영향을 제공하는 폭염 영향예보 서비스를 운영하고 있다(이동혁·김가영, 2019). 또한 2020년 5월부터 폭염특보 발령 기준이 '일최고기온'이 아닌 습도를 고려한 '일최고체감온도'를 활용하는 방향으로 변화되었다(기상청 보도자료, 2020.5.8.). 이러한 측면에서 폭염 영향을 종합적이고 실질적으로 고려하여 위기경보단계가 폭염 위험을 적절하게 경고할 수 있도록 하는 방안을 지속적으로 고민해볼 필요가 있다.

2. 재난 위험의 변화와 정책적 대응

위기경보단계 발령일과 기여사망규모를 시점에 따라 살펴보면 PM_{10} 은 감소, $PM_{2.5}$ 는 증가, 폭염은 증감을 반복하는 등 재난별로 상반된 특성을 보였다. 특히 $PM_{2.5}$ 는 앞서 연평균 농도와 같은 장기적 노출 수준은 감소하고 있지만 $PM_{2.5}$ 의 관심, 주의 단계에 해당하는 비상저감조치 발령일, 경보발령일 수준의 단기적 고농도 발생일이 증가하고 있다. 따라서 이러한 발생하는 고농도 발생일과 해당일의 농도 수준을 어떻게 관리할 것인가가 건강 영향을 최소화하기 위한 주요 정책적 과제라고 볼 수 있다.

최근 정부의 미세먼지 특별대책에서는 고농도 미세먼지 발생에 따른 사회적 우려가 확산됨에 따라 고농도 시기(12월-3월) 산업, 발전, 수송 등

각 부문별로 평시 대비 강화된 저감조치를 시행하여 기저 농도 감소를 통한 고농도 발생 강도와 빈도를 줄이는 '미세먼지 계절관리제'가 제시되기도 하였다(관계부처 합동, 2019b). 미세먼지 농도와 건강 영향간의 관계를 고려할 때 고농도 미세먼지 발생일을 줄이고 농도를 완화하는 정책적 노력이 지속적으로 이어질 필요가 있다.

한편 폭염은 PM₁₀, PM_{2.5}와 다르게 연도별 노출 수준이 상당히 크게 나타났다는데, 이는 2018년 폭염의 영향이 크기 때문이다. 2018년 극심한 폭염으로 인하여 전국 주요 도시에서 1907년 기상관측 시작 이래 가장 높은 기온이 기록되었고, 건강 부문 뿐만 아니라 산업, 농·축·수산업 등 부문별로 상당한 피해가 발생하였다(관계부처 합동, 2019a). 향후 기후변화의 영향에 따라 폭염과 같은 극한현상은 빈도와 강도, 지속기간이 증가할 것으로 예측되고 있기 때문에 폭염 영향을 최소화하기 위한 정책적 노력이 요구되고 있다(IPCC, 2012). 미세먼지와 같은 대기오염문제도 인간의 사회경제적 활동에 기인한 오염 물질 배출에 영향을 받는다는 점에서 기후변화와 유사한 측면이 있다(Maione et al., 2016). 하지만 상대적으로 미세먼지와 같은 대기오염 문제는 국가 내부의 요인을 관리하거나 인접 지역 간 협력을 통해서 농도 저감 등 비교적 단시간에 가시적 효과를 얻을 수 있다는 점에서 해결 과정의 시·공간적 범위가 기후변화 문제와 매우 다르다. 이러한 측면에서 폭염은 그 빈도와 강도는 예측하기가 상당히 어려운 불확실성을 내포하고 있는 리스크이면서 직접적으로 폭염 발생을 줄이는 것이 매우 어려우므로 기여사망 수준을 줄일 수 있는 사회·경제적 적응 노력이 중요하다.

이러한 측면에서 실질적인 폭염 리스크에 대한 취약성을 줄이는 노력도 중요하다. 예를 들어, 지역별 폭염 취약계층에 초점을 맞추어 폭염 정보 전달체계와 재난도우미 서비스의 질적 개선 및 무더위쉼터에 대한 심리적 장벽 해소 등의 개선방안이 제시되고 있다(엄지연·윤수진, 2015). 나아가 거동이 불편한 노인들을 위한 무더위쉼터 셔틀버스 서비스 제공을 통한 물리적 접근성 향상 및 심야 무더위쉼터 운영 등 정책적 지원 내용을 보다

세밀하게 구성할 필요가 있다(김대수·박종철·채여라, 2020).

한편, 본 연구에서 시군구별 미세먼지 농도는 한국환경공단의 Air Korea에서 제공하는 지점 관측 자료를 내삽하여 획득하였다. Air Korea의 대기오염측정망은 도시대기, 교외대기 측정망 등 다양한 목적에 의해 운영되고 있다. 통계적 내삽의 결과는 관측 지점의 특성에 의해 영향을 받는다(Park and Jang, 2016). 목적에 따라 관측 지점이 결정되기 때문에 내삽 결과에 관측 지점에 의한 편향이 포함되어 있을 수 있다. 하지만 본 연구에서는 이에 대하여 고려하지 못하고, 모든 관측값을 활용하여 내삽을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 KGE가 낮게 나타난 것은 통계적 내삽 방법의 한계와 함께 이러한 입력 자료의 한계도 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 높은 품질의 시군구별 미세먼지 농도 자료를 획득하기 위해서는 내삽과정에 관측망의 유형을 고려할 필요가 있다. 다만 본 연구는 내삽된 격자 단위의 분석 및 해석을 시도하지 않았으며, 시군구별 미세먼지 농도의 차이도 직접적으로 비교하지 않았기 때문에 내삽 과정에서의 한계가 연구 결과에 미치는 영향은 제한적이었을 것으로 판단된다.

VI. 결론

이 연구는 최근 자연재난과 사회재난으로 지정되어 국가적 재난 관리의 필요성이 높은 폭염과 미세먼지 문제에 주목하여 국가 예·경보 기준이 각 단계에 따라 경고하는 재난 리스크를 정량화하고자 하였다. 이를 위하여 2015년부터 2018년까지 서울 지역을 중심으로 폭염, PM₁₀, PM_{2.5}에 대하여 위기경보 기준을 초과한 날은 얼마나 되는지, 발령일의 시·각 재난의 기여사망 규모는 얼마나 되는지 분석하여 위기경보단계에 대한 정책적 제언을 제시하였다. 나아가 시점에 따라 재난별 리스크의 경향과 특성을 살펴보고 이에 따라 재난별 정책적 대응 방향을 고찰하였다.

분석 결과 동일한 위기경보단계이더라도 재난별 발령 조건이 동등한 수준으로 설정되어 있지 않아 PM₁₀과 PM_{2.5}의 위기경보가 폭염에 비하여 상대적으로 과소하게 발령되는 것으로 나타났다. 현재 미세먼지 위기경보의 관심과 주의단계 기준은 미세먼지 비상저감조치 수준 또는 예경보체계의 가장 상위단계 수준에 해당하는 심각한 고농도 조건에 해당한다. 그리고 경계나 심각 단계는 단계 발령 조건이 너무 높게 설정되어 있어서 위험이 실제로 심각함에도 불구하고, ‘경계’나 ‘심각’단계가 발령되지 않아 대중들이 위기경보의 위험 경고를 충분히 위험을 인지하지 못할 수 있다. 효과적인 재난 관리와 재난 간에 형평성 있는 정책적 대응수준을 구축하기 위하여 위기경보 기준을 관심에서 심각단계까지 적절한 위계로 조정하면서, 동일한 단계일 경우 재난 간에 동등한 수준으로 설정되도록 조정해나가는 작업이 필요한 것으로 보인다.

이 연구는 국가 리스크 관리 차원에서 최근 신설된 재난별 국가위기경보체계를 초점을 두고, 각 경보단계가 대국민에게 어느 정도의 위험을 경고할 수 있는지 살펴보았다는 점에서 기존 연구들과 다른 차별성을 가진다. 재난에 대한 단기적 관리 및 중장기 계획 수립을 통해 일반 대중들이 경보단계를 통해 재난 위험을 충분히 회피할 수 있어야하고, 국가적으로는 각 기준을 지표화하여 정책 목표를 수립하거나 정책 성과를 평가할 필요가 있다. 이 연구에서 살펴본 경보단계별 기여사망자 분석은 향후 위기경보단계 검토 및 정책 평가과정에 참고자료로 활용될 수 있다.

한편, 이 연구는 몇 가지 한계점을 가지고 있다. 우선 미세먼지의 위기경보단계 발령일 계산에 있어서 시간당 농도 자료를 보간 자료로 확보하지 못하여 관측소 자료를 이용하였고, 이에 따라 계산에 있어 약간의 오차가 있을 수 있다. 미세먼지 분석에 활용한 노출-반응 계수는 각 재난의 단기노출에 의한 사망 관련 함수를 이용하여 산출되었기 때문에 장기적인 노출에 의한 건강 영향은 고려되지 않았다. 폭염 위기경보 기준은 전국 175개 특보구역의 지역 범위를 바탕으로 설계되었으나, 연구의 공간적 범위인 서울시 25개구에 이러한 지역 범위를 준용하는 과정에서 각 위기경

보단계 발령일 계산 결과가 전국 단위의 계산 결과와 다를 수 있다. 또한 분석 기간과 지역을 한정되어 있다는 점도 한계점이라 할 수 있다.

향후 단기적, 장기적 노출에 의한 영향을 살펴보고 분석 기간과 지역을 보다 확대할 필요가 있다. 또한 이러한 분석을 축적하면서 기여사망 수준에 따라 경보단계를 어떻게 설정할 수 있고, 각 경보에 따라 어떤 정책수단이 동반될 수 있는지, 경보 시행에 따른 사망률 저감 효과는 어떠한지 추정 방향으로 후속 연구를 수행할 필요가 있다. 이러한 노력을 통해 효과적인 리스크 관리를 위한 정책 수립에 기여할 수 있을 것이다.

■ 참고문헌 ■

- 공성용·배현주·홍석표·박해용, 2013, 『초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향 평가 및 관리정책연구(II)』, (연구보고서; 2013-09), 서울: 한국환경정책·평가연구원.
- 관계부처 합동, 2019a, 『2018년 이상기후 보고서』, 서울: 기상청.
- _____, 2019b, 『미세먼지 고농도 시기('19.12~'20.3) 대응 특별대책』, 세종: 환경부.
- 국립환경과학원, 2019, 『대기환경월보(2019.1)』, (NIER-GP; 2019-042), 세종: 환경부.
- 김대수·박종철·채여라, 2020, “취약계층을 고려한 무더위쉼터 개선 방안,” 『환경정책』, 28(2), pp.211-230, DOI: 10.15301/jepa.2020.28.2.211.
- 김수인·원두환, 2018, “대기질 개선으로 인한 조기 사망률 감소의 편익추정,” 『환경정책』, 26(4), pp.45-69, DOI: 10.15301/jepa.2018.26.4.45.
- 김지영·이대근·J.Kysely, 2009, “한국 주요도시의 폭염에 대한 기후 순응도 특성,” 『대기』, 19(4), pp.309-318.
- 기상청, 2020.5.8., “폭염특보 발표시 습도 반영, 태풍 등급 ‘초강력’ 신설!” 보도자료.
- 박종철·채여라, 2020, “2018년 폭염으로 인한 온열질환자와 초과사망자 분석,” 『대한지리학회지』, 55(4), pp.391-408, DOI: 10.22776/kgs.2020.55.4.391.
- 배현주, 2014, “서울시 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 단기노출로 인한 사망영향,” 『한국환경보건학회지』, 40(5), pp.346-354, DOI: 10.5668/JEHS.2014.40.5.346.
- 배현주·정다운·간순영·박주영·임연희, 2017, 『이상기온에 따른 건강영향 평가·예측을 통한 기후변화 대응 전략 마련』, (연구보고서; 2017-06), 세종: 한국환경정책·평가연구원.

- 안소은·김진옥·조윤랑·엄영숙·곽소윤·배현주, 2017, 『빅데이터를 이용한 대기오염의 건강영향 평가 및 피해비용 추정(III)』, (사업보고서; 2017-02), 세종: 한국환경정책·평가연구원.
- 양지훈·하종식, 2013, “기후변화로 인한 고온의 미래 사망부담 추정,” 『한국환경보건학회지』, 39(1), pp.19-31, DOI: 10.5668/JEHS.2013.39.1.19.
- 양호진·이채연·채여라·박종철, 2019, “동네예보 여름철 기온 자료의 상세화를 위한 통계적 내삽 방법의 비교,” 『한국사진지리학회지』, 29(4), pp.19-32, DOI: 10.35149/jakpg.2019.29.4.002.
- 엄지연·윤수진, 2015, “저소득 노인계층에 대한 폭염대응대책 연구,” 『공간과 사회』, 54, pp.317-342, DOI: 10.19097/kaser.2015.25.4.319.
- 이나영·조용성, 2015, “여름철 폭염발생에 따른 고령자층의 의료 비용 추정 및 요인 분석,” 『환경정책』, 23(2), pp.153-172, DOI: 10.15301/jepa.2015.23.2.153.
- 이동혁·김가영, 2019, 『기상재해 영향예보』, (KISTEP 기술동향브리프; 2019-10호), 서울: 한국과학기술기획평가원.
- 임연희·이현지·홍윤철, 2019, “2006~2018년 폭염으로 인한 초과사망자 추정,” 『주간건강과 질병』, 12(37), pp.1435-1441.
- 최종일·이영수, 2015, “초미세먼지(PM_{2.5}) 배출량이 호흡기계 질환에 미치는 영향 연구,” 『환경정책』, 23(4), pp.155-172, DOI: 10.15301/jepa.2015.23.4.155.
- 하종식·문난경, 2013, “수도권 대기 중 입자상 물질로 인한 건강부담 추정과 불확실성,” 『한국대기환경학회지』, 29(3), pp.275-286, DOI: 10.5572/KOSAE.2013.29.3.275.
- 하종식·최영웅·송지윤·정옥진·양태경, 2016, 『기후·대기 환경정책에 활용하기 위한 건강 위해성 평가 개선 연구』, (사업보고서; 2016-16), 세종: 한국환경정책·평가연구원.
- 행정안전부, 2019, 『『폭염 재난』 위기관리 표준매뉴얼』, 세종: 행정안전부.
 _____, 2018.7.24., “행안부, 폭염 피해 예방을 위한 대책 강화,” 보도자료.
 _____, 2018.10.16., “재난분야 위기관리 표준매뉴얼 전면 개정된다,” 보도자료.
 _____, 2020.5.15., “올여름 극한기상으로부터 국민의 안전을 지킨다,” 보도자료.
- 환경부, 2018.3.21., “미세먼지(PM_{2.5}) 환경기준 미국 일본 수준으로 강화,” 보도자료.
 _____, 2019.1.14., “미세먼지 「비상저감조치」 전국에서 연속 발령,” 보도자료.
 _____, 2019.8.2., “향후 10년 우리나라 폭염 위험도 더욱 높아진다,” 보도자료.
 _____, 2019.10.15., “고농도 미세먼지 위기관리 표준매뉴얼 제정,” 보도자료.
- 환경정책기본법 시행령, 2020, 대통령령 제30674호.
- 황미경·김유근·오인보, 2019, “보건의료빅데이터를 이용한 여름철 일최고기온에 대한 건강위험도 평가,” 『한국환경과학회지』, 28(7), pp.617-627, DOI: 10.5322/JESI.2019.28.7.617.

- Anderson, B. G. and M. L. Bell, 2009, "Weather-related mortality: How heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States," *Epidemiology*, 20(2), pp.205-213, DOI: 10.1097/EDE.0b013e318190ee08.
- Brauer, M., M. Amann, R. T. Burnett, A. Cohen, F. Dentener, and M. Ezzati et al., 2012, "Exposure assessment for estimation of the global burden of disease attributable to outdoor air pollution," *Environmental Science & Technology*, 46(2), pp.652-660, DOI: 10.1021/es2025752.
- Casanueva, A., A. Burgstall, S. Kotlarski, A. Messeri, M. Morabito, and A. D. Flouris, et al., 2019, "Overview of existing heat-health warning systems in Europe," *International Journal Environmental Research Public Health*, 16(15), 2657, DOI: 10.3390/ijerph16152657.
- Chung, J. Y., Y. Honda, Y. C. Hong, X. C. Pan, Y. L. Guo, and H. Kim, 2009, "Ambient temperature and mortality: An international study in four capital cities of East Asia," *Science of the Total Environment*, 408(2), pp.390-396, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.09.009.
- Dumbravă, V. and S. Iacob, 2013, "Using probability-Impact matrix in analysis and risk assessment projects," *Journal of Knowledge Management, Economics and Information Technology*, 3(6), pp.76-96.
- Ebi, K. L., T. J. Teisberg, L. S. Kalkstein, L. Robinson, and R. F. Weiher, 2004, "Heat watch/warning systems save lives: Estimated costs and benefits for Philadelphia 1995-98," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(8), pp.1067-1074, DOI: 10.1175/BAMS-85-8-1067.
- IPCC, 2012, *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change*, In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, and K. L. Ebi et al. (eds.), Cambridge: Cambridge University Press.
- Fouillet, A., G. Rey, V. Wagner, K. Laaidi, P. Empereur-Bissonnet, and A. Le Tertre et al., 2008, "Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave," *International Journal of Epidemiology*, 37(2), pp.309-317, DOI: 10.1093/ije/dym253.
- Gasparrini, A., Y. Guo, M. Hashizume, E. Lavigne, A. Zanobetti, and J. Schwartz et al., 2015, "Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study," *The Lancet*, 386(9991), pp.369-375, DOI: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0.

- Heo, S., E. Lee, B. Y. Kwon, S. Lee, K. H. Jo, and J. Kim, 2016, "Long-term changes in the heat-mortality relationship according to heterogeneous regional climate: A time-series study in South Korea," *BMJ Open*, 6(8), e011786, DOI: 10.1136/bmjopen-2016-011786.
- Kysely, J. and J. Kim, 2009, "Mortality during heat waves in South Korea, 1991 to 2005: How exceptional was the 1994 heat wave?," *Climate Research*, 38(2), pp.105-116.
- Lelieveld, J., A. Pozzer, U. Pöschl, M. Fnais, A. Haines, and T. Münzel, 2020, "Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: A worldwide perspective," *Cardiovascular Research*, 116(11), pp.1910-1917, DOI: 10.1093/cvr/cvaa025.
- Liu, C., R. Chen, F. Sera, A. M. Vicedo-Cabrera, Y. Guo, and S. Tong et al., 2019, "Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities," *New England Journal of Medicine*, 381(8), pp.705-715, DOI: 10.1056/NEJMoa1817364.
- Maione, M., D. Fowler, P. S. Monks, S. Reis, Y. Rudich, and M. L. Williams et al., 2016, "Air quality and climate change: Designing new win-win policies for Europe," *Environmental Science & Policy*, 65, pp.48-57, DOI: 10.1016/j.envsci.2016.03.011.
- Park, J. and D. H. Jang, 2016, "Application of MK-PRISM for interpolation of wind speed and comparison with co-kriging in South Korea," *GIScience & Remote Sensing*, 53(4), pp.421-443, DOI: 10.1080/15481603.2016.1192373.
- Takahashi, N., R. Nakao, K. Ueda, M. Ono, M. Kondo, and Y. Honda et al., 2015, "Community trial on heat related-illness prevention behaviors and knowledge for the elderly," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(3), pp.3188-3214; DOI: 10.3390/ijerph120303188.
- Toloo, G., G. FitzGerald, P. Aitken, K. Verrall, and S. Tong, 2013, "Evaluating the effectiveness of heat warning systems: Systematic review of epidemiological evidence," *International Journal of Public Health*, 58(5), pp.667-681, DOI: 10.1007/s00038-013-0465-2.
- Vaidyanathan, A., S. Saha, A. M. Vicedo-Cabrera, A. Gasparrini, N. Abdurehman, and R. Jordan et al., 2019, "Assessment of extreme heat and hospitalizations to inform early warning systems," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(12), pp.5420-5427, DOI: 10.1073/pnas.1806393116.
- World Economic Forum, 2020, *The global risks report 2020*, Geneva: World

Economic Forum.

- Xu, Y., W. Yang, and J. Wang, 2017, "Air quality early-warning system for cities in China," *Atmospheric Environment*, 148, pp.239-257, DOI: 10.1016/J.ATMOENV.2016.10.046.
- Ye, X., R. Wolff, W. Yu, P. Vaneckova, X. Pan, and S. Tong, 2012, "Ambient temperature and morbidity: A review of epidemiological evidence," *Environmental Health Perspectives*, 120(1), pp.19-28, DOI: 10.1289/ehp.1003198.

박종문: 서울대학교 환경대학원 환경계획학과에서 도시계획학 박사학위를 취득하고 현재 한국환경정책·평가연구원(KEI)에 재직 중이다. 주요 관심 분야는 기후변화 및 환경정책 분석, 에너지 전환 및 수요 관리, 환경 인식 등이다(jmpark@kei.re.kr).

박종철: 공주대학교 일반대학원 지리정보학과에서 자연지리학 및 GIS 전공 박사학위를 취득하고 현재 한국환경정책·평가연구원(KEI)에 재직 중이다. 주요 관심 분야는 극한 기상의 영향에 대한 시공간적 분석, 폭염 및 한파 영향예보 시스템 개발 등이다(jcpark@kei.re.kr).

채여라: 영국 캠브리지 대학(University of Cambridge)에서 경영학 박사학위를 취득하고 현재 한국환경정책·평가연구원(KEI)에 재직 중이다. 주요 관심 분야는 기후변화 및 대기정책 통합 분석, 기후변화의 경제적 영향 분석, 폭염영향 분석 등이다(yrchaee@kei.re.kr).

투 고 일: 2020년 09월 04일
심 사 일: 2020년 09월 21일
게재확정일: 2020년 11월 24일