연구논문 「환경정책」 제31권 제3호 2023. 9: 65-85
DOI http://dx.doi.org/10.15301/jepa.2023.31.3.65
pISSN 1598-835X eISSN 2714-0601

초미세먼지($PM_{2.5}$) 장기노출이 고령자의 환경성질환 사망률에 미치는 영향*

The Long-Term Effect of Fine Particulate Matter(PM2.5) on Risk of Death from Environmental Disease among Older Adults

황인창**
In Chang Hwang

요약: 고령화는 사회 전반에 걸쳐 다양한 변화를 일으킨다. 이 논문은 환경보건 정책 분야에서 고령화의 영향을 살펴본다. 그 중에서도 고령화에 따른 $PM_{2.5}$ 건강영향을 분석하고 전망한다. 구체적으로 이 논문에서는 $PM_{2.5}$에 대한 장기노출이 고령자(만 65세 이상)의 환경성질환 사망률에 미치는 영향을 실증 분석하고, 고령화 추세를 반영해 2030년까지 조기사망자 수 변화를 전망한다. 실증 분석을 위해서는 콕스(Cox) 비례위험모형을 구축하고 국민건강보험공단 표본코호트 DB와 서울시 자치구별 $PM_{2.5}$ 농도를 이용해 $PM_{2.5}$ 농도와 고령자의 환경성질환 사망률 사이의 관계를 추정한다. 주요 결과로서 연평균 $PM_{2.5}$ 농도가 10㎍/㎥ 증가하면 고령자가 환경성질환으로 인해 사망할 위험은 13.9% 높아진다. 서울에서 2015년에 $PM_{2.5}$로 인한 고령자의 조기사망자 수는 1,162명인 것으로 추정된다. $PM_{2.5}$ 농도가 현재 수준을 유지한다면 고령화 추세로 인해 $PM_{2.5}$로 인한 서울의 고령자 조기사망자 수는 2030년에는 2,130명까지 증가할 것으로 전망된다. 고령화로 인해 $PM_{2.5}$ 건강 영향이 악화될 수 있음을 의미하기에 정부와 지자체는 지역별 미세먼지 상세정보 시스템 구축, 미세먼지 관련 정보전달 체계 정비 등 관련 대책을 마련할 필요가 있다.
핵심주제어: 초미세먼지, 고령화, 환경보건, 조기사망, 환경성질환

Abstract: $PM_{2.5}$ is one of the major environmental hazards responsible for deaths and illnesses worldwide. It is well known that older adults are most vulnerable to the adverse impacts of $PM_{2.5}$ and, therefore, an aging population makes the issue more problematic. This paper investigates the long-term effect of $PM_{2.5}$ on the risk of death from environmental diseases among older adults (65 years and older) in Seoul. Applying the Cox proportional hazard model to the cohort database of the National Health Insurance Service (2007-2015), the level of $PM_{2.5}$ exposure and the mortality rate from environmental diseases among older adults are associated. One of the main findings is that the total number of premature deaths among older adults in Seoul due to $PM_{2.5}$ was 1,162 in 2015 and is projected to increase to 2,130 in 2030 unless more stringent policy measures are taken to address air pollution. Policy suggestions are provided.
Key Words: $PM_{2.5}$, aging population, environmental health, premature death, environmental diseases

* 이 논문은 서울연구원 보고서인 '서울시 미세먼지 관리정책의 사회경제적 편익', '고령화와 초미세먼지 건강영향'의 일부 내용을 학술논문 형태로 보완한 글임을 밝힌다. 이 논문은 대한환경건강학회 하계학술대회(2023.6.23.)에서 발표된 바 있다. 학술대회에서 좋은 의견을 주신 토론자들과 표본코호트 DB를 사용할 수 있도록 지원해 준 국민건강보험공단(국민건강정보자료 연구지원)에게 감사를 표한다.
** 서울연구원 환경안전연구실 연구위원

I. 서론

대기오염은 전 세계 사망 및 질병 원인 중 가장 큰 환경보건 관련 위험 요소이다(WHO, 2015). 일례로 초미세먼지($PM_{2.5}$)는 심근경색, 협심증과 같은 허혈성 심장질환, 만성폐쇄성 폐질환, 뇌출혈 등을 유발하며, 고혈압, 흡연, 고혈당 다음으로 높은 사망원인이다. 또한 5세 이하 영유아에게 발생하는 급성하기도감염(기관지염, 폐렴 등)의 사망원인 중 절반 정도는 대기오염이다(Cohen et al., 2017).

$PM_{2.5}$는 입자 직경이 2.5㎛ 이하인 미세먼지로서 경제활동과 에너지 연소 과정에서의 1차 배출과 황산화물, 질소산화물, 암모늄 등 오염물질의 화학반응을 통해 대기 중에서 2차로 생성된 물질로 구성된다. $PM_{2.5}$는 폐포까지 침투할 수 있으며 혈액에 용해되어 인체를 순환하면서 다양한 조직에 영향을 미칠 수 있다. 또한 $PM_{2.5}$는 생성기작에 따라 발암물질을 포함할 수 있어 대기오염물질 중에서도 건강에 미치는 영향이 가장 높다(WHO, 2013). 일례로 2019년 기준으로 전 세계에서 대기오염으로 인해 사망한 사람은 6.5백만 명으로 추정되는데(총 사망의 12%), 그중 $PM_{2.5}$로 인한 조기사망자는 4.1백만 명으로 추정된다(GBD 2019 Risk Factors Collaborations, 2020; Sang et al., 2022).

국내 정부와 지자체는 발전소, 자동차, 배출 사업장 등에 대한 대책을 중심으로 $PM_{2.5}$ 문제 해결을 위해 다양한 노력을 기울이고 있다(Malley et al., 2023). 그러나 COVID-19 감염병이 발생하기 전까지 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 정체하고 고농도 $PM_{2.5}$ 일수는 증가하면서 $PM_{2.5}$에 대한 시민들의 관심은 폭발적으로 증가했다. 서울시민을 대상으로 한 설문조사에서 응답자의 94.5%는 국내에서도 $PM_{2.5}$를 줄이려는 노력이 필요하다고 응답하였으며(황인창 외, 2018), $PM_{2.5}$ 문제를 해결하기 위해서라면 가구 당 지방세 형태로 매년 138천원(지불용의액)을 지불할 용의가 있는 것으로 분석되었다(황인창·손원익, 2020). 이러한 결과는 $PM_{2.5}$ 문제에 대한 시민들의 높은 관심을 반영한다.

고령화는 사회 전반에 걸쳐 다양한 변화를 일으킬 것으로 예상된다(이진

면 외, 2012; 박종서 외, 2017; 서지영 외, 2018). 특히 한국은 고령화 추세가 전 세계에서 가장 빠른 국가 중 하나이기에 고령화에 따른 영향을 부문별로 분석하고 이에 대한 대책을 마련할 필요가 있다(UNDESA, 2019). 환경정책 분야 역시 마찬가지이다. 연령대에 따라 물질과 에너지 소비 패턴이 달라 고령화로 인해 생활하수, 폐기물, 온실가스, 대기오염물질 등의 배출량이 달라질 수 있기 때문이다(Raty and Carlsson-Kanyama, 2009; 이상열, 2015). 뿐만 아니라 고령자는 건강에 영향을 미치는 환경오염에 상대적으로 취약하기에 고령화가 환경보건에 미치는 영향을 분석하고 대책을 마련할 필요가 있다(신용승 외, 2016). 특히 $PM_{2.5}$의 건강 영향은 고령자에게서 더 큰 것으로 알려져 있는데(Cohen et al., 2017), 한국의 고령화 추세는 앞으로 더욱 심화될 것으로 전망되고 있어 그 영향을 예측하고 대책을 마련할 필요가 있다.

미세먼지의 건강 영향은 연구목적에 따라 다양한 방법을 통해 분석할 수 있다. 장기노출에 대한 영향을 분석하는 연구에서는 대체로 코호트(cohort) 자료를 활용해 수년에 걸친 장기간의 건강영향을 추적하고 평가할 수 있는 비례위험모형(proportional hazard model)을 활용하며, 단기노출에 대한 영향을 분석하는 연구에서는 일별 시계열 자료 등을 활용해 고농도의 급성 영향을 파악할 수 있는 일반화선형모형(generalized linear model) 또는 일반화가법모형(generalized additive model)을 활용하고 있다(Abbey et al., 1991; Puett et al., 2009; Kim et al., 2015).[1)]

이 논문에서는 서울의 사례를 통해 $PM_{2.5}$ 장기노출이 고령자에게 미치는 건강 영향을 분석하고 이를 바탕으로 2030년의 고령자 조기사망자 수를 전망한다. 구체적으로 이 논문은 국민건강보험공단의 표본코호트 자료를 바탕으로 $PM_{2.5}$에 대한 장기노출이 만 65세 이상 고령자의 환경성질환 사망률에 미치는 영향을 콕스 비례위험모형(Cox, 1972)으로 분석하였다.

이 논문이 기존 연구와 차별성을 갖는 것은 $PM_{2.5}$ 장기노출로 인한 서울시 고령자의 사망위험 변화를 국민건강보험공단의 대규모 코호트 자료를 활용

1) 개별 방법론의 특징과 적용사례 등에 대해서는 이종태·김호 (2001), Dominici et al. (2003), Pope Ⅲ and Dockery (2006) 등을 참고할 수 있다.

해 분석한다는 점이다. 관련하여 김운수·김정아(2013), 공성용 외(2013)는 $PM_{2.5}$의 단기영향을 분석하였으며, 안소은 외(2016)는 PM10에 대한 영향을 분석하였다. 최종일·이영수(2015)는 특정 질환 입원에 대해 분석하였으며, Leem et al. (2015), Han et al. (2018)은 $PM_{2.5}$ 농도 변화에 따른 사망률 변화를 직접 추정하기보다는 해외 문헌에서 제시한 값을 가져와서 사용하였다. Seo et al. (2010), Son et al. (2011), Kim et al. (2020)은 영유아와 임산부 등을 대상으로 미세먼지의 건강 영향을 분석했다. Heo et al. (2014), Park et al.(2021), Park et al.(2022), Lee et al. (2020)은 배출원과 입자 특성에 따른 $PM_{2.5}$ 단기영향을 분석했다. Lee et al.(2020)은 22명의 자원자를 모집해 6~12개월에 걸쳐 측정한 결과를 바탕으로 $PM_{2.5}$ 노출이 혈압과 심장박동 등 심혈관계에 미치는 영향을 분석했다.

이 논문은 아래와 같이 구성되어 있다. 먼저 2장에서는 분석 방법과 자료를 제시한다. 이 논문에서는 콕스 비례위험모형을 통해 $PM_{2.5}$ 장기노출이 고령자의 사망위험에 미치는 영향을 추정하였다. 3장에서는 분석 결과를 제시한다. 4장에서는 정책제언과 함께 연구의 한계와 향후 과제를 제시하는 것으로 논문을 마무리한다.

II. 분석 방법 및 자료

1. 분석방법

1) 개요

이 논문의 가설은 '$PM_{2.5}$ 고농도에 장기간 노출된 고령자와 그렇지 않은 고령자의 환경성질환으로 인한 조기사망률은 통계적으로 다르지 않다(귀무가설)'이다. 이를 검증하기 위해 이 연구에서는 2007년 기준 서울시에 거주한 고령자(만 65세 이상)의 사망 여부와 원인을 2015년까지 추적 조사했다. 분석기간은 건강관련 자료와 $PM_{2.5}$ 농도 관측 자료의 가용성을 고려해 선정했

다. $PM_{2.5}$로 인해 발생할 수 있는 환경성질환으로는 기존 문헌에서 인과관계가 밝혀진 허혈성 심장질환(IHD), 만성폐쇄성 폐질환(COPD), 폐암(LC), 뇌혈관질환(stroke) 등 4가지를 포함하였다(e.g., Park, 2019; Yang et al., 2021; Choi and Kim, 2021).[2)]

서울시에서 위의 4가지 질환으로 인해 2015년에 사망한 사람의 현황은 다음과 같다. 〈표 1〉은 질환의 발병 원인과는 상관없이 질환별로 발생한 사망자 총 숫자를 나타낸 것이다. 서울시에 거주하는 만 65세 이상 고령자 중에서는 2015년에 허혈성 심장질환, 만성폐쇄성 폐질환, 폐암, 뇌혈관질환으로 인해 사망한 자는 총 7,422명이었으며, 10만 명 당 사망률은 618명이었다. 이는 전체 연령대의 동일 질환 사망률보다 6.6배 높은 것으로 고령자가 이러한 질환으로 인해 사망할 위험이 더 높음을 보여준다.

〈표 1〉 서울시 원인별 사망자 수(2015년)

		전체		만 65세 이상	
		사망자 (명)	사망률 (10만 명 당 사망)	사망자 (명)	사망률 (10만 명 당 사망)
환경성 질환	허혈성 심장질환	2,112	21	1,606	134
	만성 폐쇄성 폐질환	743	8	687	57
	폐암	2,807	28	2,152	179
	뇌혈관질환	3,683	37	2,977	248
	합계	9,345	94	7,422	618
총 사망		43,053	435	31,286	2,604

자료: 통계청 국가통계포털

2) 콕스 비례위험모형

이 논문은 $PM_{2.5}$ 장기노출로 인한 조기사망률의 변화를 분석하기 위해 비례위험모형을 구축하였다. 비례위험모형의 기본적인 구조는 아래와 같다. 먼저 비례위험모형의 핵심적인 개념으로서 위험함수(hazard function)는 〈식 1〉과 같이 정의된다. 곧 위험함수는 t 시기까지 생존한 사람이 dt 만큼 시

2) 국민건강보험공단의 표본코호트 DB에서 허혈성 심장질환, 만성폐쇄성 폐질환, 폐암, 뇌혈관질환의 사망원인 코드는 각각 I20~I25, J40~J44, C33~C34, I60~I69이다.

간이 지나는 동안 사망하게 될 확률을 의미한다.

$$\lambda(t) = \lim_{dt \to 0} \frac{\Pr(t \leq T < t + dt | T \geq t)}{dt} \qquad \langle 식\ 1 \rangle$$

여기서 λ는 위험함수, $\Pr(\bullet)$은 확률, t는 시각, dt는 시간의 변화량, T는 사망 시점, $\lim(\bullet)$은 극한 연산자를 의미한다.

비례위험모형에서는 실험군(여기서는 고농도 $PM_{2.5}$에 장기간 노출된 집단)의 위험함수가 대조군의 위험함수와 비례적 관계를 갖는다고 가정한다. 〈식 2〉는 비례위험모형 중에서도 사례 연구에서 가장 많이 활용되고 있는 콕스 모형(Cox, 1972)을 나타낸다. 콕스 모형에서는 실험군의 위험함수가 대조군의 위험함수와 비례적 관계를 가질 뿐 아니라, 성, 연령, 소득, 환경 지표, 건강관련 지표 등 다양한 설명 변수들과 지수함수 관계를 갖는다고 가정한다.

$$\lambda_i(t|X_i) = \lambda_0(t)\exp(X_i\beta) \qquad \langle 식\ 2 \rangle$$

여기서 λ_0는 대조군의 위험함수, λ_i는 실험군의 위험함수(i는 식별번호), $\exp(\bullet)$는 지수함수, X는 설명 변수 벡터(소득, 나이, 성별, $PM_{2.5}$, 흡연 여부, 체질량지수 등), β는 파라미터(parameter) 벡터를 의미한다.

모형을 구축한 후에는 통계 자료를 활용해 β값을 추정할 수 있다. 이때 β는 $PM_{2.5}$ 농도가 한 단위 증가할 때 사망률이 변하는 정도로 해석할 수 있는데, 통계적으로는 모형의 우도함수(likelihood function)를 최대화하는 방식으로 β값을 추정한다. $PM_{2.5}$ 장기노출이 고령자의 사망률에 통계적으로 유의미한 영향을 미치는 것으로 확인되면($\beta \neq 0$), 추정된 β값을 기초로 $PM_{2.5}$로 인한 고령자의 환경성질환 사망률 변화를 계산할 수 있다.

3) 조기 사망자 수 산정

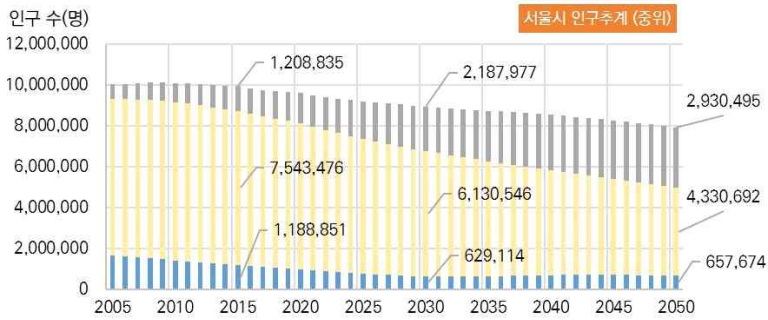
$PM_{2.5}$로 인한 조기 사망자 수 변화는 다음과 같은 방식으로 계산한다. 〈식 2〉에서 통계적으로 유의미한 β값이 산정되면 상대 위험비(relative risk ratio) $\exp(X_i\beta)$를 산정할 수 있다. 상대 위험비는 대조군(평균적인 농도에 노출된 집단)과 비교한 실험군의 상대적인 사망위험 비율을 의미한다. 비례위험모형에서 상대 위험비는 분석 목적에 따라 다른 농도(예를 들어 환경기준 상 농도)에 대비한 값으로 쉽게 환산하여 사용할 수 있다. 실제로 상대 위험비를 분석한 국제 연구(Cohen et al., 2017; Chen and Hoek, 2020)에 따르면, 서울시 자치구별 연평균 $PM_{2.5}$ 농도 변동 범위(15~35$\mu g/m^3$) 내에서는 대체로 이러한 비례관계가 성립한다.

비교 대상이 되는 기준 농도에 대한 상대 위험비가 위와 같이 산정되면 기준 농도에서의 환경성질환 사망률을 추정할 수 있다. 이러한 사망률을 바탕으로 기준 농도에 도달했을 때 환경성질환 사망자 수가 현재 대비 얼마나 변화될지를 산정할 수 있다. 2015년을 예를 들어 살펴보면, 2015년의 환경성질환 사망자 수(A)는 〈표 1〉에서처럼 국가 통계에서 확인할 수 있다. 만일 서울시가 2015년에 국가의 $PM_{2.5}$ 농도 환경기준을 달성했다고 가정하면, 앞서 설명한 바와 같이 사망률이 달라지기에 환경성질환 사망자 수(B)도 달라진다. 이때 조기 사망자 수는 두 경우의 $PM_{2.5}$ 농도 차이로 인한 환경성질환 사망자 수의 변화(A-B)이다.

통계청의 장래인구추계 자료를 활용하면 $PM_{2.5}$ 장기노출로 인한 사망자 수가 고령화로 인해 장래에 어떻게 변할지도 예측할 수 있다. 서울에서는 〈그림 1〉과 같이 만 65세 이상 고령자 수가 2015년 121만명(고령화율 12.2%)에서 2030년에는 219만명(고령화율 24.5%), 2050년에는 293만명(고령화율 37.0%)까지 증가할 것으로 전망된다.[3)]

3) 참고로 전국의 고령화율은 2015년 12.8%에서 2030년 25.5%, 2050년 40.1%까지 증가할 전망이다.

〈그림 1〉 서울시 연령별 인구 전망



주: 연도별 막대그래프에서, 위에서부터 회색은 만 65세 이상, 노란색은 만 15~64세, 파란색은 만 15세 미만을 의미함
자료: 통계청 장래인구추계 (2020년 기준)

2. 분석 자료

1) 국민건강보험공단 표본코호트 DB

$PM_{2.5}$의 장기 건강영향을 비례위험모형으로 산정하기 위해서는 추적 가능한 건강관련 정보가 필요하다. 이 논문에서는 국민건강보험공단에서 구축한 표본코호트 2.0 DB (국민건강보험공단, 2017)를 사용하였다. 국민건강보험공단 자료에는 2006년을 기준으로 확률 추출된 전국 1백만 명에 대해 2002년~2015년까지 건강관련 자료가 축적되어 있다. 구체적으로 표본코호트 DB에는 〈표 2〉와 같이 비식별조치된 개인별 질병이력 및 건강행태, 사망자료, 인구사회적 특성 등이 제공되고 있다. 이 논문에서는 표본코호트 DB를 SQL 언어를 활용해 조정한 후 분석했다.

표본코호트 DB에서 이 논문의 분석 기준년도인 2007년에 서울시에 거주한 고령자는 총 18,273명이었다. 이 논문에서는 이들에 대해 2015년까지의 사망 여부, 사망원인, 인구사회학적 특성 등의 정보를 추출해 사용했다.

〈표 2〉 표본코호트 DB 분석 항목

항목		자격 및 보험료	사망	진료	일반 건강검진	요양기관
인구사회적 특성	성별	●				
	연령	●				
	거주지역	●				
	소득(보험료분위)	●				
	의료보장 유형	●				
	장애	●				
질병이력 및 건강행태	과거력/가족력				●	
	흡연/음주/신체활동				●	
신체계측 및 검사결과	키/몸무게/BMI				●	
	흉부X선 촬영				●	
	혈압/혈당				●	
	기타 검사결과				●	
의료이용	상병			●		
	입원/외래/응급실			●		
	처치 및 투약			●		
	의료비용			●		
사망	사망연월		●			
	사망원인		●			
요양기관	기본특성					●
	인력/시설					●

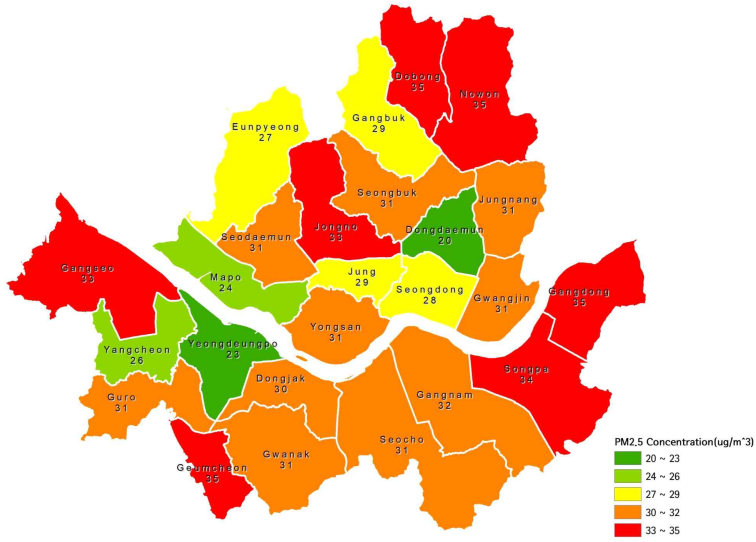
출처: 국민건강보험공단(2017)

2) $PM_{2.5}$ 농도

국내에서 전국적으로 $PM_{2.5}$ 농도 관측이 시작된 것은 2015년이다. 서울에서는 2002년 이후 일부 자치구에서 $PM_{2.5}$ 농도를 관측해왔다는 점에서 여러 해에 걸친 $PM_{2.5}$ 건강 영향 연구가 가능하다. 서울시 전체 자치구에서 $PM_{2.5}$ 농도 관측이 시작된 것은 2007년이기에 이 논문에서는 2007년을 기준으로 서울에 거주한 시민을 추적 관찰하였다. 구체적으로 2007년 한 해 $PM_{2.5}$에 노출된 시민이 2015년까지 사망할 확률을 분석하였다. 자료는 $PM_{2.5}$ 농도를 직접 관측하고 있는 서울특별시 보건환경연구원에서 제공받았다. 2007년 서울시의 자치구별 $PM_{2.5}$ 연평균 농도는 〈그림 2〉와 같다. 서울시 전체의

2007년 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 30㎍/㎥이었으며 자치구별 농도의 표준편차는 3.9㎍/㎥이었다(최대값과 최소값은 각각 35㎍/㎥, 20㎍/㎥).

〈그림 2〉 서울시 자치구별 $PM_{2.5}$ 연평균 농도(2007년)



자료: 서울특별시보건환경연구원 내부자료

Ⅲ. 분석 결과

1. $PM_{2.5}$ 장기노출 사망위험

모형에 대한 통계 분석 결과 $PM_{2.5}$ 평균 농도가 높은 지역에 거주한 고령자일수록 환경성질환 사망 위험이 높아지는 것으로 나타났다. 구체적으로 연평균 $PM_{2.5}$ 농도가 10㎍/㎥ 높은 자치구에 거주하는 고령자의 사망위험은 그렇지 않은 집단에 비해 13.9% 증가했다. $PM_{2.5}$ 농도 이외에도 〈표 3〉과 같이 남성일수록, 소득이 낮을수록, 나이가 많을수록 환경성질환으로 인한 사망위험이 더 높아지는 것으로 분석되었다.[4)]

4) 이 논문에서는 표에서 제시한 것보다 더 많은 설명 변수를 추가하여 통계분석을 했지

〈표 3〉 고령자 사망위험도(전체)

		표준오차	p-value	상대 위험비	95% 신뢰구간		대조군
성	-0.810	0.062	〈0.001	0.445	0.394	0.502	1.6
소득	-0.035	0.010	0.000	0.965	0.947	0.983	6.7
나이	0.119	0.005	〈0.001	1.126	1.116	1.136	72.2
$PM_{2.5}$	0.013	0.007	0.081	1.013	0.998	1.02β8	29.8

주: N=18,273명, 환경성질환 사망자=1,108명, LR statistic=713.95 (p-value〈0.001), 상대 위험비는 $PM_{2.5}$ 농도가 1㎍/㎥ 상승할 때 기준

질환별로는 허혈성 심장질환과 뇌혈관질환으로 인한 사망위험은 통계적으로 유의미하게 높아졌지만, 만성폐쇄성 폐질환과 폐암으로 인한 사망위험은 통계적으로 유의미하지 않았다. 구체적으로 $PM_{2.5}$ 연평균 농도가 10㎍/㎥ 증가하면 다음 표와 같이 허혈성 심장질환 사망위험은 59.6% 증가했으며, 뇌혈관질환 사망위험은 17.9% 증가했다.

〈표 4〉 고령자 사망위험도(허혈성 심장질환)

	β	표준오차	P-value	상대 위험비	95% 신뢰구간		대조군
성	-0.624	0.128	〈0.001	0.536	0.339	0.523	1.6
소득	-0.021	0.021	0.308	0.980	0.940	1.005	6.7
나이	0.126	0.010	〈0.001	1.135	1.124	1.144	72.2
$PM_{2.5}$	0.047	0.016	0.005	1.048	1.007	1.063	29.8

주: N=18,273명, 허혈성 심장질환 사망자=254명, LR statistic=181.47 (p-value〈0.001), 상대 위험비는 $PM_{2.5}$ 농도가 1㎍/㎥ 상승할 때 기준

〈표 5〉 고령자 사망위험도(뇌혈관질환)

	β	표준오차	P-value	상대 위험비 (relative risk ratio)	95% 신뢰구간		대조군
성	-0.373	0.092	〈0.001	0.689	0.575	0.824	1.6
소득	-0.038	0.014	0.007	0.963	0.936	0.990	6.7
나이	0.131	0.007	〈0.001	1.140	1.125	1.156	72.2
$PM_{2.5}$	0.016	0.011	0.141	1.017	0.995	1.039	29.8

주: N=18,273명, 뇌혈관질환 사망자=500명, LR statistic=361.26 (p-value〈0.001), 상대 위험비는 $PM_{2.5}$ 농도가 1㎍/㎥ 상승할 때 기준

만, 흡연과 체질량지수(BMI) 등이 포함되면 샘플 수가 크게 감소하는 등의 이유로 통계적으로 유의미한 값이 산출되지 않았다. 관련한 내용은 4장에서 좀 더 자세히 다루기로 한다.

조사대상(연령), 지역, 시기 등이 달라 직접적인 비교는 어렵지만, 이 논문의 결과는 기존 문헌의 결과와 유사한 범위 내에서 도출된 결과라고 할 수 있다. 관련하여 WHO(2021)는 미세먼지를 포함한 대기오염물질의 건강 영향에 대한 문헌 검토를 바탕으로 권고기준을 발표하는데, 미세먼지로 인한 조기사망 위험에 관한 문헌은 Chen and Hoek (2020)에 정리되어 있다. Chen and Hoek (2020)은 코호트 데이터를 활용해 $PM_{2.5}$의 사망 영향을 산출한 문헌 71건을 메타 분석하였는데, 보고된 문헌의 특징은 우선 분석 대상(나이, 기저질환 여부 등), 지역, 시점에 따라 산출 결과가 크게 다르다는 점이다. 구체적으로 $PM_{2.5}$ 농도가 10㎍/㎥ 상승할 때 조기사망 위험이 논문에 따라서는 14% 감소하는 것부터 26% 증가하는 것까지 다양하게 분포한다. 한편 기존 연구는 대부분 일반 성인을 대상으로 하고 있으며, 고령자나 영유아 등 특정 연령을 대상으로 분석하고 결과를 보고한 연구는 상대적으로 적었다. 이러한 시사점은 2000년 이후 아시아 태평양 국가를 대상으로 건강영향을 분석한 기존 문헌들을 비교 분석한 Yang et al. (2022)에서도 동일하게 발견된다. 결과적으로 고령자만을 대상으로 한 기존 연구를 일괄적인 틀에서 종합 비교하기는 현재로서는 어렵다. 따라서 이하에서는 전체 인구를 대상으로 한 메타 분석 결과를 중심으로 기존 문헌의 결과와 이 논문의 결과를 비교한다.

Chen and Hoek (2020)은 기존 문헌을 메타 분석하여 $PM_{2.5}$ 농도가 10㎍/㎥ 상승할 때 조기사망 위험은 평균적으로 약 8% 증가하는 것으로 추정하였다(95% 신뢰구간: 6~9%). 질환별로는 심혈관계질환과 뇌혈관질환의 조기사망 위험이 각각 16%(95% 신뢰구간: 10~21%)와 11%(95% 신뢰구간: 4~18%) 증가하는 것으로 추정하였다. 이는 이번 논문에서 제시한 결과보다는 다소 낮은 값이다. 이는 Chen and Hoek (2020)이 분석한 문헌들이 대부분 북미와 유럽을 대상으로 한 연구였기 때문일 것으로 판단된다. $PM_{2.5}$의 상대위험도는 평균 농도가 높을수록 커지는 것으로 알려져 있는데, 북미와 유럽의 $PM_{2.5}$ 농도는 한국보다 상대적으로 낮다(Shin et al., 2016; Cohen et al., 2017; Popp Ⅲ et al., 2019; Burnett and Cohen, 2020).

Wang et al. (2022)은 고령자만을 대상으로 한 대표적인 연구사례로서 미

국의 코호트 자료를 바탕으로 $PM_{2.5}$ 농도가 2.63㎍/㎥ 상승할 때 고령자의 조기사망 위험이 2.7% 증가하는 것으로 추정했다. 이는 $PM_{2.5}$ 농도가 10㎍/㎥ 상승할 때 고령자의 조기사망 위험은 10.7% 증가하는 것과 같다. 이는 이번 논문의 결과보다는 다소 낮은 값인데 이는 조사 대상의 인구 사회학적 특징이 다르다는 점 외에도 Wang et al. (2022)이 조사한 지역의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도(9.6㎍/㎥)가 서울에 비해 낮다는 점이 하나의 원인일 것이다. 한편 Yang et al. (2018)은 홍콩의 기저질환자(신장질환)를 대상으로 한 연구에서 $PM_{2.5}$ 농도가 10㎍/㎥ 상승할 때 고령자의 조기사망 위험이 3% 증가하는 것으로 추정했다. 다만 기저질환자를 대상으로 한 연구이기에 일반 시민을 대상으로 한 이번 논문의 결과와 직접적인 비교는 어렵다.

2. 조기사망자 수

서울시의 2015년 $PM_{2.5}$ 연평균 농도는 23㎍/㎥이었다.[5] 이는 국가 환경기준(15㎍/㎥)보다 8㎍/㎥ 높고 2015년 당시 WHO 권고기준(10㎍/㎥)보다는 13㎍/㎥ 높은 것이다.[6] 〈식 2〉와 〈표 3〉에서 산정한 상대 위험비 값을 활용하면, 서울시 $PM_{2.5}$ 농도가 국가 환경기준을 초과함으로 인해 발생한 2015년의 고령자 조기 사망자 수는 738명으로 추정된다. 국가 환경기준보다 더 강한 WHO 권고기준을 초과함으로 인해 발생한 조기 사망자 수는 1,162명으로 추정된다.

Han et al. (2018)은 2015년 기준 $PM_{2.5}$ 장기노출로 인한 한국의 조기사망자 수를 지역별로 산출한 바 있다. Han et al. (2018)이 조기사망자수를 산정한 방식은 기본적으로는 이 논문과 유사하다. 다만 Han et al. (2018)은 Burnett et al.(2014)이 제시한 상대위험도 함수를 적용하고 대기모형에서 산출한 지역별 $PM_{2.5}$ 농도 값을 사용했다는 점에서 이 논문과는 세부 방법이 다르다. Han et al. (2018)은 서울이 $PM_{2.5}$ 평균 농도 10㎍/㎥를 달성하지 못함

5) 한국환경공단 에어코리아(http://airkorea.or.kr)
6) WHO(2021)는 연평균 농도기준을 5㎍/㎥로 강화하였다. 이를 반영하면 WHO 권고기준을 달성하지 못함으로 인해 발생하는 조기 사망자 수는 더 높아질 것이다.

으로 인해 2015년에 발생한 총 조기사망자 수를 1,252명으로 추정하였다. 서울의 환경성질환 총 사망자 중에서 고령자가 대부분을 차지한다는 점(〈표 1〉 참고)에서 이 논문의 결과는 단순하게 비교하면 Han et al. (2018)의 결과에 비해 다소 높게 추정된 결과라고 볼 수 있다. 그러나 이 논문은 Han et al. (2018)과 달리 고령자의 상대위험도 함수를 직접 추정한 후 고령자 조기 사망자수를 산출했다는 점에서, 이러한 차이는 직접적인 비교는 어려우며 방법론상의 차이에 기인한 것으로 보는 것이 타당하다.

〈표 6〉 $PM_{2.5}$로 인한 서울시 고령자 조기사망자 수(2015년)

	현황		환경기준 대비		WHO 권고 대비	
	총사망 (명)	사망률 (10만명당)	기준 달성시 사망률 (10만명)	기준 미달성으로 인한 추가 사망 (명)	기준 달성시 사망률(10만명당)	기준 미달성으로 인한 추가 사망 (명)
환경성질환	7,422	618	557	738	522	1,162
총 사망	31,286	2,604	-	-	-	-

주: 국가 환경기준(15㎍/㎥), 2015년 당시 WHO 권고기준(10㎍/㎥)

〈표 7〉은 통계청에서 발표한 서울의 장래 고령화 인구 전망치를 반영해 2030년의 $PM_{2.5}$로 인한 조기 사망자 수를 산출한 결과이다. 고령화의 효과만을 분석하기 위해 2030년에도 서울의 $PM_{2.5}$ 연평균 농도는 2015년 수준으로 유지된다고 가정하였다. 현재 고령자의 질환별 사망률을 반영하면 2030년에 서울시에서 환경성질환으로 인해 사망하는 고령자는 모두 13,716명이 될 것으로 전망된다. 만일 서울시가 국가 $PM_{2.5}$ 환경기준을 달성하면 환경성질환 사망자는 12,360명으로 감소할 것으로 전망된다. 이는 서울시가 환경기준을 달성하지 못해 발생한 조기 사망자 수가 2015년 738명에서 2030년에는 1,354명까지 증가할 수 있음을 의미한다. 서울시가 국가 환경기준보다 더 강한 WHO 권고기준을 달성하지 못해 발생한 조기 사망자 수는 2015년 1,162명에서 2030년에는 2,130명까지 증가할 전망이다. 이러한 결과는 고령화로 인해 서울시의 $PM_{2.5}$ 건강영향 취약성이 향후 큰 폭으로 높아질 수 있음을 보여주는 것이다. 달리 표현하면 서울시가 $PM_{2.5}$ 농도를 개선하면 이로

인한 편익이 더 커질 수 있음을 의미한다.

〈표 7〉 고령화와 초미세먼지로 인한 서울시 고령자 조기사망자 수(2030년)

	농도 유지	환경기준 달성		WHO 권고 달성	
	사망(명)	사망(명)	사망 감소(명)	사망(명)	사망 감소(명)
환경성질환	13,716	12,360	1,354	11,583	2,130
총 사망	57,783	-	-	-	-

주: 2030년 고령자 수 전망은 〈그림 1〉 참고

Ⅵ. 결론

이 논문은 국민건강보험공단의 표본코호트 DB를 활용해 $PM_{2.5}$의 장기 건강영향을 추정하고 고령자 조기 사망자 수 변화를 전망하였다. 분석결과 $PM_{2.5}$ 연평균 농도가 10㎍/㎥ 증가하면 고령자의 사망위험은 13.9% 증가했다. 서울시가 $PM_{2.5}$ 국가 환경기준을 달성하지 못해 발생한 고령자 조기 사망자 수는 고령화에 따라 2015년에 738명에서 2030년에는 1,354명까지 크게 증가할 것으로 전망된다.

이 논문의 결과는 향후 고령화로 인해 $PM_{2.5}$ 건강영향 취약성이 큰 폭으로 높아질 수 있음을 보여주는 것이면서 동시에 $PM_{2.5}$ 농도 개선의 편익 역시 향후 큰 폭으로 높아질 수 있음을 의미한다. 이에 정부는 다양한 사업들을 발굴하여 $PM_{2.5}$ 건강영향으로부터 고령자들을 보호할 수 있어야 한다. 몇 가지 방안을 제시하면 다음과 같다. 먼저 지역별로 미세먼지 배출원 정보와 농도 정보를 포함하는 상세한 미세먼지 지도를 작성하고 이를 고령자 밀집지역 및 주요 활동지역과 연계하여 지역 특성에 따라 배출원을 관리해 나갈 수 있어야 한다. 서울시와 경기도, 부산시를 포함하여 일부 지자체에서는 미세먼지 배출원 정보를 상세화하는 작업을 수행해왔는데 이를 통해 구축한 정보를 효율적으로 활용할 수 있도록 관리 체계와 시스템을 마련해야 할 것이다.

미세먼지 상세정보를 바탕으로 미세먼지 예·경보의 정확도를 높이고, 고령자들이 관련 정보를 쉽게 습득할 수 있도록 정보전달 체계를 정비하는 작

업 역시 검토해야 한다. 일반적으로 고령자는 스마트폰이나 인터넷을 통한 정보습득이 어려운 경우가 많기 때문에 보다 접근성이 좋은 방안을 마련할 필요가 있다. 또한 경로당 등 노인복지시설 주변에 녹지를 조성하거나, 도로 등 주변 배출원에서의 미세먼지 유입을 차단할 수 있도록 식물을 이용한 차단막(green screen) 등을 설치하는 것도 필요할 수 있다.

마지막으로 연구의 한계와 향후 과제를 제시한다. 이 논문에서는 자료의 한계로 $PM_{2.5}$ 농도 자료를 자치구 수준으로만 수집하여 활용할 수 있었다. 현재까지 $PM_{2.5}$ 농도는 자치구 내 대표지점 1곳에서만 측정되고 있기 때문이다. 자치구 내에서도 거주 동이나 도로 등 주요 배출원에서의 거리에 따라 초미세먼지 농도에 노출되는 정도가 달라질 수 있다는 점에서(Hoek et al., 2002) 이번 연구에서 분석한 결과는 한계점이 있다. 또한 $PM_{2.5}$에 노출되는 정도는 거주하는 지역의 평균 농도뿐 아니라 개인의 생활양식(통근 또는 통학, 여가생활 등)에 따라 달라질 수 있다. 이 논문이 주로 다루고 있는 고령자는 자치구 간 이동은 적을 수 있지만, 상대적으로 실내에 머무르는 시간이 많다는 점에서 실내 공기질 역시 노출(exposure) 수준에 영향을 미칠 수 있다. 향후 동 또는 마을 단위까지 $PM_{2.5}$ 농도 정보를 정밀화하고 생활양식과 실내 공기질을 반영할 수 있다면, $PM_{2.5}$ 노출이 건강에 미치는 영향을 보다 정밀하게 평가할 수 있을 것이다.

분석 대상자들의 $PM_{2.5}$ 노출 정도를 장기적으로 추적 조사하기 위해서는 전국적인 단위에서의 농도 관측 자료가 필요하다. 그러나 $PM_{2.5}$ 농도 관측이 전국 지자체 단위로 확장된 것은 2015년 이후이기 때문에 이번 연구에서는 관찰 대상자가 서울이 아닌 다른 지역으로 이사를 한 경우에는 추적 조사를 할 수 없었다. 향후 더 많은 정보가 담긴 건강보험공단 표본 코호트 DB를 활용하고, $PM_{2.5}$ 자료가 전국 단위로 확대된다면 보다 정밀한 분석이 가능할 것이다.

이 논문을 수행하는 과정에서는 관찰 대상자의 흡연 여부나 체질량 지수 등 기초건강 자료를 포함한 분석도 수행했지만, 통계적으로 유의미한 결과를 얻지 못했다. 표본코호트 DB에서 흡연 여부를 포함한 건강 정보는 문진

데이터를 통해 확인할 수 있다. 그러나 연도별로 건강검진을 받는 대상자가 달라 기초건강 자료를 포함해 분석하면 분석대상 숫자가 크게 감소한다. 이 논문에서는 2007~2009년 문진 자료에서 분석 대상자의 흡연 정보를 추출해 분석하는 등 여러 방법을 시도했지만 통계적 유의성이 크게 증가하지는 않았다. 이에 흡연 여부나 체질량 지수 등 개인 기초건강 정보를 활용한 보다 확대된 분석은 향후 연구과제로 남긴다.

이 논문에서는 성별이나 나이, 소득 또한 환경성질환 사망률에 미치는 영향이 유의미함을 확인할 수 있었다. 향후 이러한 변수들의 상호작용을 모형에 명시적으로 반영하여 그 영향을 산출하고 장래 인구구조 변화(연령별, 성별)와 소득구조 변화 등과 결합한다면, 인구와 사회경제구조의 변화가 $PM_{2.5}$로 인한 조기 사망자 수 변화에 미치는 영향을 보다 유의미하게 살펴볼 수 있을 것이다. 이는 향후 연구과제로 남긴다.

▮참고문헌▮

공성용·배현주·홍석표·박해용, 2013,『초미세먼지($PM_{2.5}$)의 건강영향평가 및 관리 정책 연구』, 한국환경정책·평가연구원.

국민건강보험공단, 2017, “표본 코호트 2.0 DB 사용자 매뉴얼”, 국민건강보험공단.

김운수·김정아, 2013,『서울시 기후환경 변화의 건강영향 분석연구』, 서울연구원.

박종서·이삼식·유삼현·전광희·염지혜·성명재 등, 2017,『저출산·고령화에 따른 미래 가족 변화의 사회경제적 영향과 정책 과제』, 한국보건사회연구원.

서지영·우청원·김선지, 2018,『과학기술 기반 초고령사회 대응 방안』, 과학기술정보통신부.

신용승·배현주·하종식·백해용·정진희·강정은 등, 2016,『기후변화에 따른 건강영향 평가·적응 기술 및 정책지원 시스템 개발』, 환경부.

안소은·배현주·곽소윤·임연희·김명희·오서연, 2016,『빅데이터를 이용한 대기오염의 건강영향 평가 및 피해비용추정(2)』, 한국환경정책·평가연구원.

이상열, 2015, “고령화사회의 심화와 에너지 소비,”『에너지수급브리프』, 2(1), 에너지경제연구원.

이종태·김호, 2001, “대기오염의 건강 영향 평가를 위한 역학연구 설계 및 방법론”,『예방의학회지』, 34(2), pp.119-126.

이진면·민성환·정윤선·김바우·김재진, 2012,『고령화를 고려한 중장기 산업구조 전망』, 산업연구원.

최종일·이영수, 2015, "초미세먼지($PM_{2.5}$) 배출량이 호흡기계 질환에 미치는 영향연구," 『환경정책』, 23(4), pp.155-172.

통계청, 2020, "시도별 장래인구추계", 국가통계포털.

황인창·김창훈·손원익, 2018,『서울시 미세먼지 관리정책의 사회경제적 편익』, 서울연구원.

황인창, 2019, "고령화와 초미세먼지 건강영향",『정책리포트』, 287, 서울연구원.

황인창·손원익, 2020, "서울시 미세먼지 관리정책의 사회경제적 편익: 지불용의액 분석을 중심으로,"『산업연구』, 4(1), pp.107-134.

Abbey, D. E., F. Petersen, P. K. Mills, and W. Beeson, 1991, "Long-term ambient concentration of total suspended particulates and oxidants as related to incidence of chronic disease in California Seventh-Day Adventists," *Environmental Health Perspectives*, 94, pp.43-50.

Burnett, R., and A. Cohen, 2020, "Relative Risk Functions for Estimating Excess Mortality Attributable to Outdoor $PM_{2.5}$ Air Pollution: Evolution and State-of-the-Art", *Atmosphere*, 11(589).

Burnett, R. T., C. A. Pope III, M. Ezzati, C. Olives, S. S. Lim, S. Mehta et al., 2014, "An Integrated Risk Function for Estimating the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Fine Particulate Matter Exposure," *Environmental Health Perspectives*, 122, pp.397-403.

Chen, J. and G. Hoek, 2020, "Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A T systematic review and meta-analysis," *Environment International*, 143, 105974.

Choi, W. and K. Y. Kim, 2021, "Association between exposure level of air pollutants and incidence rate of circulatory disease in residential and industrial areas of South Korea", *International Journal of Environmental Health Research*, 32(11), pp.2450-2459.

Cohen, A. J., M. Brauer, R. Burnett, H. R. Anderson, J. Frostad, K. Estep et al., 2017, "Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015," *The Lancet*, 389(10082), pp.1907-1918.

Cox, D. R., 1972, "Regression models and life-tables," *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 34(2), pp.187-220.

Dominici, F., L. Sheppard, and M. Clyde, 2003, "Health effects of air pollution: A statistical review," *International Statistical Review*, 71(2), pp.243-276.

GBD 2019 Risk Factors Collaborators, 2020, "Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019", *The Lancet*, 396, pp.1223-1249.

Han, C., S. Kim, Y. H. Lim, H. J. Bae and Y. C. Hong, 2018, "Spatial and temporal trends of number of deaths attributable to ambient PM2. 5 in the Korea," *Journal of Korean Medical Science*, 33(30).

Heo, J., J. J. Schauer, O. Yi, D. Paek, H. Kim, S. M. Yi, 2014, "Fine particle air pollution and mortality: importance of specific sources and chemical species," *Epidemiology*, pp.379-388.

Hoek, G., B. Brunekreef, S. Goldbohm, P. Fischer and P. A. van den Brandt, 2002, "Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study," *The Lancet*, 360(9341), pp.1203-1209.

Kim, K., E. Kabir, and S. Kabir, 2015, "A review on the human health impact of airborne particulate matter," *Environment International*, 74, pp.136-143.

Kim, S., J. Lee, S. Park, G. Rudasingwa, S. Lee, S. Yu et al., 2020, "Association between peak expiratory flow rate and exposure level to indoor $PM_{2.5}$ in asthmatic children, using data from the escort intervention study," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7667.

Lee, D. H., S. H. Kim, S. H. Kang, O. K. Kwon, J. J. Park, C. H. Yoon et al., 2020, "Personal exposure to fine particulate air pollutants impacts blood pressure and heart rate variability," *Scientific Reports*, 10(1), 16538.

Lee, K. H., J. Park, J. Woo, J. Kim, J. Heo, C. H. Lee et al., 2020, "The effects of organic compounds of $PM_{2.5}$ in Seoul on LPS/or poly (I: C)-induced inflammation and phagocytosis," *European Respiratory Journal*, 56(1983).

Leem, J. H., S. T. Kim, and H. C. Kim, 2015, "Public-health impact of outdoor air pollution for 2nd air pollution management policy in Seoul metropolitan area, Korea," *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 27, pp.1-9.

Malley, C., I. C. Hwang, D. Kim, K. D. Cho, K. Kim, E. Michalopoulou et al., 2023, *Achieving clean air for blue skies in Seoul, Incheon and Gyeonggi, Republic of Korea*, UNEP.

Park, S. K., 2019, "Assessing the impact of ozone and particulate matter on mortality rate from respiratory disease in Seoul, Korea," *Atmosphere*, 10(11), 685.

Park, E. H., H. Kim and J. Heo, 2022, "The impact of size-segregated particle

properties on daily mortality in Seoul, Korea," *Environmental Science and Pollution Research*, 29(30): 45248-45260.

Park, J., K. H. Lee, H. Kim, J. Woo, J. Heo, C. H. Lee et al., 2021, "The impact of organic extracts of seasonal PM 2.5 on primary human lung epithelial cells and their chemical characterization," *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 59868-59880.

Popp Ⅲ, C. A. and D. W. Dockery, 2006, "Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect," *Journal of Air and Waste Management Association*, 56, pp.709-742.

Pope III, C. A., J. S. Lefler, M. Ezzati, J. D. Higbee, J. D. Marshall, S. Y. Kim et al., 2019, "Mortality risk and fine particulate air pollution in a large, representative cohort of US adults," *Environmental Health Perspectives*, 127(7), 077007.

Puett, R. C., J. E. Hart, J. D. Yanosky, C. Paciorek, J. Schwartz, H. Suh et al., 2009, "Chronic fine and coarse particulate exposure, mortality, and coronary heart disease in the Nurses' Health Study," *Environmental Health Perspectives*, 117(11), 1697-1701.

Raty, R., and A. Carlsson-Kanyama, 2009, *Comparing energy use by gender, age and income in some European countries*, Swedish Energy Agency.

Sang, S., C. Chu, T. Zhang, H. Chen and X. Yang, 2022, "The global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter in 204 countries and territories, 1990-2019: A systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2019," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 238, 113588.

Seo, J. H., J. H. Leem, E. H. Ha, O. J. Kim, B. M. Kim, J. Y. Lee et al., 2010, "Population-attributable risk of low birthweight related to PM10 pollution in seven Korean cities," *Paediatric and perinatal epidemiology*, 24(2), pp.140-148.

Shin, H. H., A. J. Cohen, C. A. Pope III, M. Ezzati, S. S. Lim, B. J. Hubbell et al., 2016, "Meta-analysis methods to estimate the shape and uncertainty in the association between long-term exposure to ambient fine particulate matter and cause-specific mortality over the global concentration range," *Risk Analysis*, 36(9), pp.1813-1825.

Son, J. Y., M. L. Bell, and J. T. Lee, 2011, "Survival analysis of long-term exposure to different sizes of airborne particulate matter and risk of infant mortality using a birth cohort in Seoul, Korea," *Environmental Health Perspectives*, 119, pp.725-730.

UNDESA, 2019, *World population prospects 2019,* United Nations Department of Economic and Social Affair.

Wang, Y., S. Xiao, Y. Zhang, H. Chang, R. V. Martin, A. van Donkelaar et al., 2022, "Long-term exposure to $PM_{2.5}$ major components and mortality in the southeastern United States," *Environment International*, 158, 106969.

WHO, 2013, *Health risks of air pollution in Europe: HRAPIE project*, World Health Organization.

WHO, 2015, *Health and the environment: addressing the health impact of air pollution*, Sixty-eighth world health assembly agenda item 14.6, World Health Organization.

WHO, 2021, *WHO global air quality guidelines*, World Health Organization.

Yang Y, R. Tang, H. Qiu, P. C. Lai, P. Wong, T. Q. Thach et al., 2018, "Long term exposure to air pollution and mortality in an elderly cohort in Hong Kong," *Environment International*, 117, pp.99-106.

Yang, S., O. J. Kim, M. Shin, W. J. Kim and S. Y. Kim, 2021, "Association between long-term exposure to high levels of ambient air pollution and incidence of lung cancer in a population-based cohort," *Environmental Research*, 198, 111214.

황인창: 네덜란드 VU University Amsterdam에서 경제학 박사학위를 취득하고 현재 서울연구원 환경안전연구실에 재직 중이다. 주요 관심 분야는 기후경제모형, 기후변화, 환경정책 등이며, "Active learning and optimal climate policy", "The effect of learning on climate policy under fat-tailed risk", "Fat-tailed risk about climate change and climate policy" 등의 논문을 발표한 바 있다(ichwang@si.re.kr).

투 고 일: 2023년 07월 12일
심 사 일: 2023년 07월 17일
게재확정일: 2023년 09월 26일