



Original Article

대기오염물질이 손상으로 인한 손실수명연수에 미치는 영향: 서울특별시를 중심으로

강선우 , 정수빈 , 이혜원*

순천향대학교 보건행정경영학과

Effect of Ambient Air Pollution on Years of Life Lost from Deaths due to Injury in Seoul, South Korea

Sun-Woo Kang, Subin Jeong, and Hyewon Lee*

Department of Health Administration and Management, Soonchunhyang University

ABSTRACT

Background: Injury is one of the major health problems in South Korea. Few studies have evaluated both intentional and unintentional injury when investigating the association between exposure to air pollutants and injury.

Objectives: We aimed to explore the association between short-term exposure to ambient air pollution and years of life lost (YLLs) due to injury.

Methods: Data on daily YLLs for 2002~2019 were obtained from the the Death Statistics Database of the Korean National Statistical Office. This study estimated short-term exposure to particulate matter with an aerodynamic diameter of $<10 \mu\text{m}$ (PM_{10}), particulate matter with an aerodynamic diameter of $<2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$), sulfur dioxide (SO_2), nitrogen dioxide (NO_2), carbon monoxide (CO), and ozone (O_3). This time series study was conducted using a generalized additive model (GAM) assuming a Gaussian distribution. We also evaluated a delayed effect of ambient air pollution by constructing a lag structure up to seven days. The best-fitting lag was selected based on smallest generalized cross validation (GCV) value. To explore effect modification by intentionality of injury (i.e., intentional injury [self-harm, assault] and unintentional injury), we conducted stratified subgroup analyses. Additionally, we stratified unintentional injury by mechanism (traffic accident, fall, etc.).

Results: During the study period, the average daily YLLs due to injury was 307.5 years. In the intentional injury, YLLs due to self-harm and assault showed positive association with air pollutants. In the unintentional injury, YLLs due to fall, electric current, fire and poisoning showed positive association with air pollutants, whereas YLLs due to traffic accident, mechanical force and drowning/submersion showed negative associations with air pollutants.

Conclusions: Injury is recognized as preventable, and effective strategies to create a safe society are important. Therefore, we need to establish strategies to prevent injury and consider air pollutants in this regard.

Key words: Air pollutants, death, injury, years of life lost

Received May 11, 2023

Revised June 14, 2023

Accepted June 15, 2023

Highlights:

- We explore the effect of air pollutants on YLLs due to injury in Seoul, South Korea.
- YLLs due to self-harm and assault showed positive associations with air pollutants.
- YLLs due to fall, electric current, fire, and poisoning showed positive associations with air pollutants.
- YLLs due to traffic accident, mechanical force and drowning showed negative associations with air pollutants.

*Corresponding author:

Department of Health Administration and Management, Soonchunhyang University, 22 Soonchunhyang-ro, Asan 31538, Republic of Korea
Tel: +82-41-530-3045
Fax: +82-41-530-3085
E-mail: hwlee@sch.ac.kr

I. 서 론

손상(injury)은 외부의 작용에 의해 신체에 장애가 발생하는 것으로 행위의 의도에 따라 자살, 테러, 폭력, 학대 등과 같은 의도적 손상과 낙상, 충돌, 재난·재해, 운수사고, 화상과 같

이 일상적인 생활환경에서 발생하는 비의도적 손상 및 의도 미 확인 손상으로 구분된다. 손상은 평균수명의 증가로 인한 질병 구조의 변화와 높은 사망률로 인해 전 세계적으로 주요한 사회 경제적 문제로 여겨지고 있다.¹⁾ 우리나라에서도 손상은 3대 사망원인에 포함되며, 손상 전후 삶의 변화가 큰 주요한 건강문제



로 여겨지고 있다.²⁾ 2015년 전체 사망 중 손상으로 인한 사망률은 10.4%로 OECD 국가 중 1위였으며³⁾ 통계청에서 발표된 2019년 10만 명당 주요 사망원인별 사망률에 따르면 외부요인으로 인한 사망자는 인구 10만 명당 53.1명으로 전체 사망원인 중 악성신생물 다음으로 높은 사망률을 나타내었다.⁴⁾ 손상으로 인한 진료비는 2020년 5조 147억 원으로 2011년 3조 358억 원 보다 65.2% 증가한 수치를 나타내었다.⁵⁾ 이렇듯 지속적으로 증가하는 손상으로 인한 사회적 부담을 경감시키기 위해 손상으로 인한 사망에 영향을 미치는 요인을 파악하는 것이 필요하다.

주요 대기오염물질은 직경에 따라 구분되는 공기 중 액적 입자와 고체 상태의 입자의 혼합물인 미세먼지(particulate matter with an aerodynamic diameter of <10 μm , PM₁₀)와 초미세먼지(particulate matter with an aerodynamic diameter of <2.5 μm , PM_{2.5})가 있으며, 대기 중에 배출된 휘발성유기화합물(volatile organic compounds)과 질소산화물(nitrogen oxide)의 광화학 반응으로 만들어진 오존(ozone, O₃), 일산화질소(nitrogen monoxide)가 산화되어 발생하는 이산화질소(nitrogen dioxide, NO₂), 석탄, 석유 등의 화학연료를 연소시킬 때 배출되는 이산화황(sulfur dioxide, SO₂) 및 연료의 탄소 성분이 불완전하게 연소하였을 경우 발생하는 일산화탄소(carbon monoxide, CO)가 대표적이며⁶⁾ 이러한 대기오염물질은 산화스트레스와 신경염증을 통해 호흡기 질환 및 심혈관질환 등에 영향을 미친다고 알려져 있다.⁷⁾ 최근에는 신경염증이나 대기오염물질로 인한 뇌장벽 손상으로 인해 신경계 질환에도 영향을 미친다고 보고되었다.⁸⁾

선행연구에 따르면 대기오염물질의 노출이 산화스트레스와 신경염증을 유발하여 뇌혈관 질환을 발생시키고, 인지 기능이 저하될 수 있다는 가설을 발표하였다. 특히 뇌의 신경세포는 대기오염노출에 취약한 것으로 보고되어 대기오염물질이 신경계에 염증을 일으키면 인지가 저하되거나 주의력이 감소하여 낙상과 같은 손상이 발생할 가능성이 높을 수 있다.⁹⁾ 또한 대기오염물질에 의해 눈과 상기도의 직접적인 자극이 일어나면 조급함과 불쾌한 기분을 유발할 수 있다고 결과를 제시하였으며, 급성 대기오염물질에 노출되면 코르티솔, 코르티손, 에피네프린을 포함한 세로토닌과 스트레스 호르몬의 수치가 증가하여 충동적이고 공격적인 행동을 유발하고 손상으로 이어질 수 있다는 가설이 발표되었다.¹⁰⁾ 그동안 대기오염물질과 손상으로 인한 사망 간의 연관성을 조사한 국내의 선행연구 대부분은 의도적 손상 특히 자살에 초점을 맞춘 경우가 많았다.^{11,12)} 그러나 한국인의 안전보고서¹³⁾에 따르면 자살 다음으로 운수사고, 낙상으로 인한 사망률이 높은 것으로 나타났다.¹⁴⁾ 과거 사고로 인한 손상은 피치 못할 상황으로 인식되었으나 최근에는 만성질환과 같이 예방이 가능하다고 인식되어¹⁵⁾ 비의도적, 의도적 손상의 원인을 포괄적으로 파악하는 것이 필요하다.

지금까지 손상으로 인한 사망과 관련된 선행연구들은 대부분 사망률을 중점으로 연구를 진행했다.¹¹⁾ 손상은 연령과 상관없이 일어날 수 있으며 조기사망의 위험이 높다고 알려져 조기사망을 평가하는 것이 더 중요하다.¹⁶⁾ 사망률의 경우 사망 당시의 나이를 고려하지 못하기 때문에 예측하지 못하는 조기사망을 평가하기에 한계가 있다.¹⁰⁾ 조기사망으로 인한 생존연수의 상실을 나타내는 손실수명연수(years of life lost; YLLs)의 경우 사망 연령과 각 연령별 사망자 수를 함께 고려할 수 있어 조기사망을 평가할 수 있다. 이와 같이 YLLs은 손상으로 인한 사회적 부담을 더 구체적으로 파악할 수 있어 의료 자원 및 예방 프로그램을 설계하는데 더 유용할 수 있다.¹⁷⁾ 따라서 본 연구에서는 서울특별시에서 6개 대기오염물질 노출과 손상으로 인한 YLLs과의 연관성을 분석하여 밝히고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 자료 및 대상

본 연구는 사망진단서를 기반으로 하는 통계청(<https://kosis.kr/>)의 사망원인통계 데이터를 사용하였다.¹⁸⁾ 사망원인통계는 사망원인을 검토하여 한국표준질병사인분류 7차(KCD-7)에 따라 분류하고, 세계보건기구(World Health Organization, WHO)의 국제표준질병사인분류 10차 개정(ICD-10)에서 권고하는 제표형태로 원사인을 103개 항목으로 분류하여 공표하고 있다.¹⁹⁾ 본 연구는 2002년 1월 1일부터 2019년 12월 31일까지 발생한 사망자 중 손상으로 인한 사망환자를 대상으로 하였으며, 사망원인코드로 외인 코드 V00-Y09를 부여받은 환자 65,572명을 추출하였다.

통계청에서 사망원인통계 데이터 외에도 손실 함수, 사망 연령, 사망자 수 등을 고려하여 2002년부터 2019년까지 구축한 생명표를 통해 성별, 사망 연령 및 사망 연도에 따른 각 사망자 개인의 YLLs을 산출하였다.²⁰⁾ 그리고 개인 YLLs을 합산하여 YLLs에 대한 시계열 데이터를 구축하였다.²¹⁾ 또한 YLLs의 합계를 손상별로 분류하였고, 손상은 ICD-10에 따라 크게 손상의 의도성에 따라 비의도적 손상과 의도적 손상(고의적 자해[이하 자살] [X60-X84] 및 가해[X85-Y09])으로 나누었다. 그리고 비의도적 손상의 경우 손상 기전별로 나누어 운수사고(V00-V99), 낙상(W00-W19), 무생물성 기계적 힘에 의한 노출(이하 기계적 힘) (W20-W49), 익사 및 익수(이하 익사) (W65-W74), 전류의 노출(W85-W87) (이하 감전), 연기, 불 및 불꽃에 노출(이하 화재) (X00-X09), 유독성 물질에 의한 불의의 중독 및 노출(이하 중독) (X40-X49)로 분류하여 살펴보았다.

대기오염물질 자료는 환경부의 에어코리아에서 제공하는 서울특별시 대기환경정보시스템에서 시간대별로 제공되는 PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO 및 O₃에 대한 자료를 사용하였다. 모든

대기오염물질은 2002년부터 2019년까지 제공되었다. 각 대기오염물질의 일별 대푯값으로 PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ 및 NO₂의 경우에는 24시간 측정값의 일별 평균값을 사용하였고, CO와 O₃의 경우에는 8시간 이동평균 최댓값을 사용하였다.²²⁾ 또한 서울 기상관측소(<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>)에서 측정 한 온도, 상대습도, 기압의 일별 24시간 평균값과 강수량, 일조량의 일별 24시간 값을 사용하였다.

2. 통계분석

본 연구는 손상으로 인한 사망의 특성을 알아보고자 손상원인별 기술 통계분석을 수행하였다. 대기오염물질 간 및 기상요인 간의 상관성을 확인하기 위하여 스피어만 상관분석(Spearman's correlation analysis)을 수행하였다. 그리고 대기오염물질 자료와 손상으로 인한 사망의 YLLs 자료가 모두 일별 단위로 구축된 시계열 자료임을 고려하여 시계열 분석을 시행하였다. 그리고 UNIVARIATE 프로시저를 통해 YLLs이 정규분포 양상을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 대기오염물질 단기 노출과 손상으로 인한 사망의 YLLs 간의 연관성을 평가하기 위해 정규분포를 가정한 일반화 가법 모형(generalized additive model, GAM)을 사용하였다. 대기오염물질과 손상으로 인한 사망의 YLLs 사이의 연관성을 규명하기 위하여 설계한 모형의 식은 아래와 같다.

$$E(YLL_t) = \alpha + \beta_1 \times air\ pollutants_t + s(temperature_t, df=3) + s(humidity_t, df=3) + s(pressure_t, df=3) + s(rainfall_t, df=3) + s(sunshine_t, df=3) + factor(DOW) + factor(holiday) + s(time, 18 \times 7)$$

이 모형에서 $E(YLL_t)$ 는 서울에서 t 일의 예상 YLLs을 의미하

고, α 는 회귀식의 y 절편, β_1 은 대기오염 농도가 한 단위만큼 증가할 때 손상으로 인한 사망의 YLLs 회귀계수를 나타낸다. $air\ pollutants_t$ 는 t 일의 각 대기오염물질 농도를 나타내고, $s(\cdot)$ 는 대기오염과 YLLs 간에 비선형적 관계를 보일 수 있는 혼란변수를 통제하기 위한 평활함수를 의미하며, df (degrees of freedom)는 자유도를 의미한다. DOW (day of week)와 $holiday$ 는 각각 요일 효과와 휴일을 의미하고, 범주형 변수 형태로 보정한 혼란변수이다. 이를 통하여 서울의 대기오염 농도가 사분위범위(interquartile range, IQR)만큼 증가할 때 손상으로 인한 사망의 YLLs 증가와 95% 신뢰구간(confidence interval, CI)을 추정하였다.

$$change\ in\ YLLs = \beta_1 \cdot IQR$$

$$95\% CI = (\beta_1 \pm 1.96 \cdot SE) \cdot IQR$$

β_1 은 대기오염 농도의 회귀계수를 의미한다. 본 연구는 사망한 날부터 7일 전까지의 단일 시차(single lag)와 누적 시차(cumulative lag) 구조를 설정하고, generalized cross validation (GCV) 값이 제일 작은 가장 적합한 모형을 선정하여 각 대기오염물질이 손상원인별 YLLs에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 민감도 분석으로 two pollutant model을 수행하려 하였으나 대기오염물질 간의 상관도가 높아 추정치의 편향이 발생할 수 있어 single pollutants model 분석만 실시하였다. 모든 통계분석은 SAS version 9.4 (SAS institute Inc., Cary, NC)와 R version 4.2.1 (version 4.2.1, R development Core Team)을 사용하여 분석하였고 5% 유의수준에서 통계적 검정을 수행하였다.

III. 결 과

Table 1은 2002~2019년 동안 서울의 손상으로 인한 사망자 수에 대한 손상원인별 기술 통계량이다. 연구기간 동안 총

Table 1. Descriptive statistics for death counts due to injury

Variable	N (%)									
	Total	Intentional injury				Unintentional injury				
		Self-harm	Assault	Traffic accident	Fall	Mechanical force	Drowning/subnersion	Electric current	Fire	Poisoning
Total	65,572	39,348 (95.3)	1,946 (4.7)	12,142 (50.0)	8,233 (33.9)	859 (3.5)	1,452 (6.0)	219 (0.9)	809 (3.3)	564 (2.3)
Sex										
Male	44,924	26,259 (96.1)	1,076 (3.9)	8,745 (49.7)	5,780 (32.9)	788 (4.5)	1,201 (6.8)	165 (0.9)	539 (3.1)	371 (2.1)
Female	20,604	13,089 (93.8)	870 (6.2)	3,397 (51.1)	2,453 (36.9)	71 (1.1)	251 (3.8)	10 (0.2)	270 (4.1)	193 (2.9)
Age										
<15 years	1,073	132 (42.7)	177 (57.3)	411 (53.8)	129 (16.9)	24 (3.1)	123 (16.1)	3 (0.4)	65 (8.5)	9 (1.2)
15~64 years	46,370	29,872 (95.2)	1,500 (4.8)	8,378 (55.9)	3,750 (25.0)	714 (4.8)	1,025 (6.8)	163 (1.1)	543 (3.6)	425 (2.8)
≥65 years	18,085	9,344 (97.2)	269 (2.8)	3,353 (39.6)	4,354 (51.4)	121 (1.4)	304 (3.6)	9 (0.1)	201 (2.4)	130 (1.5)

65,572명의 환자가 손상으로 서울특별시에서 사망하였다. 의도적 손상의 경우 사망환자는 자살(95.3%) 및 가해(4.7%) 순이었다. 비의도적 손상의 경우 사망환자는 운수사고(50.0%)가 가장 높았으며, 낙상(33.9%), 익사(6.0%), 기계적 힘(3.5%), 화재(3.3%), 중독(2.3%) 및 감전(0.9%) 순이었다. 손상 환자를 성별로 살펴보았을 때, 남성의 경우 의도적 손상으로 인한 사망환자는 자살(96.1%) 및 가해(3.9%) 순이었고, 비의도적 손상으로 인한 사망환자는 운수사고(49.7%), 낙상(32.9%), 익사(6.8%), 기계적 힘(4.5%), 화재(3.1%), 중독(2.1%) 및 감전(0.9%) 순이었다. 여성의 경우 의도적 손상으로 인한 사망환자는 자살(93.8%) 및 가해(6.2%) 순이었고, 비의도적 손상으로 인한 사망환자는 운수사고(51.1%), 낙상(36.9%), 화재(4.1%), 익사(3.8%), 중독(2.9%), 기계적 힘(1.1%) 및 감전(0.2%) 순이었다. 손상 환자를 연령별로 살펴보았을 때, 의도적 손상으로 인한 사망환자는 모든 연령 집단에서 자살 및 가해 순이었고, 비의도적 손상으로 인한 사망환자는 15세 미만 집단의 경우 운수사고(53.8%), 낙상(16.9%), 익사(16.1%), 화재(8.5%), 기계적 힘(3.1%), 중독(1.2%) 및 감전(0.4%) 순이었다. 15~64세 집단의 경우 운수사고(55.9%), 낙상(25.0%), 익사(6.8%), 기계적 힘(4.8%), 화재(3.6%), 중독(2.8%) 및 감전(1.1%) 순이었고, 65세 이상 집단의 경우 낙상(51.4%), 운수사고(39.6%), 익사(3.6%), 화재(2.4%), 중독(1.5%), 기계적 힘(1.4%) 및 감전(0.1%) 순이었다.

Table 2는 손상으로 인한 YLLs에 대한 원인별 일별 기술 통계량이다. 의도적 손상의 경우 YLLs의 일평균±표준편차는 자살(193.3±103.9년), 가해(11.1±25.0년) 순이었다. 비의도적 손상의 경우 사망환자의 YLLs의 일평균±표준편차는 운수사고(58.5±55.7년)가 가장 높았으며, 낙상(25.0±28.1년), 익사(8.0±22.5년), 기계적 힘(3.9±12.5년), 화재(4.1±16.9년), 중독(2.7±10.9년) 그리고 감전(0.9±5.9년) 순이었다. 손상 환자를 성별로 살펴보았을 때, 남성의 경우 의도적 손상 YLLs의 일평균은 자살 및 가해 순이었고, 비의도적 손상 YLLs의 일평균은 운수사고, 낙상, 익사, 기계적 힘, 화재, 중독 및 감전 순이었다. 여성의 경우 의도적 손상의 YLLs의 일평균은 자살 및 가해 순이었고, 비의도적 손상 YLLs의 일평균은 운수사고, 낙상, 화재, 익사, 중독, 기계적 힘 및 감전 순이었다. 손상 환자를 연령별로 살펴보았을 때, 의도적 손상 YLLs의 일평균은 모든 연령 집단에서 자살 및 가해 순이었고, 비의도적 손상 YLLs의 일평균은 15세 미만 집단과 15~64세 집단의 경우 운수사고, 낙상, 익사, 화재, 기계적 힘, 중독 및 감전 순이었으며, 65세 이상 집단의 경우 낙상과 운수사고의 순위만 뒤바뀌고 뒤에 순위는 다른 연령 집단과 같았다.

Table 3은 연구기간 동안 대기오염물질 및 기상요인에 대한 일평균 기술 통계량이다. 6개 대기오염물질의 각 일평균±표준편차는 PM₁₀이 52.9±38.2 µg/m³, PM_{2.5}가 27.5±17.3 µg/m³, NO₂

Table 2. Daily descriptive statistics of years of life lost by injury

Variable	Intentional injury			Unintentional injury								
	Total	Intentional injury	Self-harm	Assault	Uninten-tional injury	Traffic accident	Fall	Mechanical force	Drowing/subersion	Electric current	Fire	Poisoning
Total	307.5±125.0	204.4±106.4	193.3±103.9	11.1±25.0	103.1±73.6	58.5±55.7	25.0±28.1	3.9±12.5	8.0±22.5	0.9±5.9	4.1±16.9	2.7±10.9
Sex												
Male	202.7±94.7	124.8±75.4	119.2±73.9	5.6±16.0	77.8±60.8	43.2±45.6	19.3±24.4	3.5±11.4	6.7±20.2	0.8±5.6	2.7±12.3	1.7±8.6
Female	104.8±73.1	79.6±66.0	74.1±63.8	5.5±17.6	25.2±34.3	15.4±27.4	5.7±13.6	0.4±5.1	1.3±8.2	0.1±1.6	1.4±9.7	0.9±6.4
Age												
<15 years	11.7±32.0	3.4±16.7	1.4±9.5	2.0±13.7	8.4±27.0	4.5±19.1	1.5±10.3	0.3±4.4	1.3±10.3	0.0±1.5	0.7±9.7	0.1±2.9
15~64 years	265.2±117.1	184.2±101.6	175.6±100.1	8.6±19.9	81.0±64.6	48.0±50.0	17.2±24.3	3.4±11.4	6.2±18.7	0.8±5.7	3.1±12.8	2.3±10.1
≥65 years	30.5±20.5	16.8±15.6	16.3±15.3	0.5±2.7	13.7±13.1	6.0±9.1	6.4±8.7	0.2±1.9	0.5±2.7	0.0±0.5	0.3±2.2	0.2±1.8

SD: Standard deviation.

Table 3. Daily descriptive statistics of air pollutants and meteorological factors

Variables	Mean±SD	Min	Median	Max	IQR
Air pollutants					
PM ₁₀ (μg/m ³)	52.9±38.2	4.6	45.8	1,016.4	33.4
PM _{2.5} (μg/m ³)	27.5±17.3	2.9	23.8	374.5	18.1
NO ₂ (ppb)	35.2±12.3	8.7	33.6	92.2	17.9
SO ₂ (ppb)	5.2±2.0	2.0	4.7	21.7	2.1
O ₃ (ppb)	29.6±16.5	1.9	27.0	106.3	22.1
CO (0.1 ppm)	0.67±0.28	0.23	0.60	2.70	0.32
Meteorological variables					
Temperature (°C)	12.9±10.5	-14.7	14.4	33.7	18.4
Humidity (%)	60.3±14.9	18.3	60.4	99.4	21.8
Pressure (hPa)	1,016.2±8.2	989.9	1,016.3	1,038.1	13.0
Sunshine (hr)	5.9±4.0	0.0	6.7	13.5	7.1
Rainfall (mm)	9.9±83.8	0.0	0.0	3,153.0	0.5

SD: Standard deviation, IQR: Interquartile range, PM₁₀: Particulate matter with an aerodynamic diameter <10 μm, PM_{2.5}: Particulate matter with an aerodynamic diameter <2.5 μm, NO₂: Nitrogen dioxide, SO₂: Sulfur dioxide, O₃: Ozone, CO: Carbon monoxide. The 24-hour means for PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, and SO₂, and the maximum 8-hour means for O₃ and CO.

Table 4. Spearman correlation coefficients between air pollutants and meteorological factors

	Air pollutants						Meteorological factors				
	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO ₂	SO ₂	O ₃	CO	Temperature	Humidity	Pressure	Sunshine	Rainfall
PM ₁₀ (μg/m ³)	1	0.92*	0.65*	0.65*	-0.01	0.69*	-0.24*	-0.12*	0.19*	0.00	-0.26*
PM _{2.5} (μg/m ³)		1	0.68*	0.62*	-0.01	0.72*	-0.15*	0.03	0.14*	-0.08*	-0.20*
NO ₂ (ppb)			1	0.68*	-0.25*	0.83*	-0.29*	-0.15*	0.37*	-0.04	-0.24*
SO ₂ (ppb)				1	-0.16*	0.69*	-0.47*	-0.30*	0.45*	0.13*	-0.34*
O ₃ (ppb)					1	-0.39*	0.54*	-0.11*	-0.51*	0.45*	-0.16*
CO (0.1 ppm)						1	-0.46*	-0.08*	0.47*	-0.12*	-0.17*
Temperature (°C)							1	0.41*	-0.79*	-0.04	0.16*
Humidity (%)								1	-0.49*	-0.62*	0.59*
Pressure (hPa)									1	0.17*	-0.36*
Sunshine (mm)										1	-0.55*

*p<0.05.

가 35.2±12.3 ppb, SO₂가 5.2±2.0 ppb, O₃가 29.6±16.5 ppb 및 CO가 0.67±0.28 (0.1 ppm)이었다. 기상요인의 평균은 기온이 12.9°C, 습도가 60.3%, 기압이 1,016.2 hPa, 일조량이 5.9 hr 그리고 강수량이 9.9 mm이었다.

Table 4는 일별 대기오염물질 및 기상요인의 상관성을 파악하기 위해 스피어만 상관분석을 수행한 결과이다. O₃를 제외한 대기오염물질은 물질들 간에 강한 양의 상관관계를 보였다. 그리고 PM₁₀, PM_{2.5} 및 NO₂의 경우 기상요인과 다소 약한 상관관계를 보였지만 SO₂, O₃ 및 CO의 경우 기상요인과 다소 강한 상관관계를 보였다.

Fig. 1은 대기오염물질별 농도의 일별추세를 나타낸 그림이

다. PM₁₀은 연구기간 초반에 연평균 기준을 초과하였지만, 시간이 흐를수록 점차 감소하여 연평균 기준을 초과하지 않는 수준까지 감소하였다. 그리고 SO₂를 제외하고 모든 대기오염물질의 연평균 농도가 각 대기오염물질의 연평균 기준을 초과하는 양상을 보였으며, O₃의 경우 2002년까지는 8시간 평균 기준을 넘지 않았으나 2003년부터 기준을 넘어 증가하는 추세를 보였다.

Fig. 2는 YLLs 총합의 일평균에 대한 추세를 나타낸 그림이다. 의도적 손상의 경우 연구기간 동안 2012년도까지 손상으로 인한 YLLs가 증가하다가 감소하는 경향을 보였으며 이는 자살에서도 유사한 경향을 보였다. 그리고 비의도적 손상은 대체

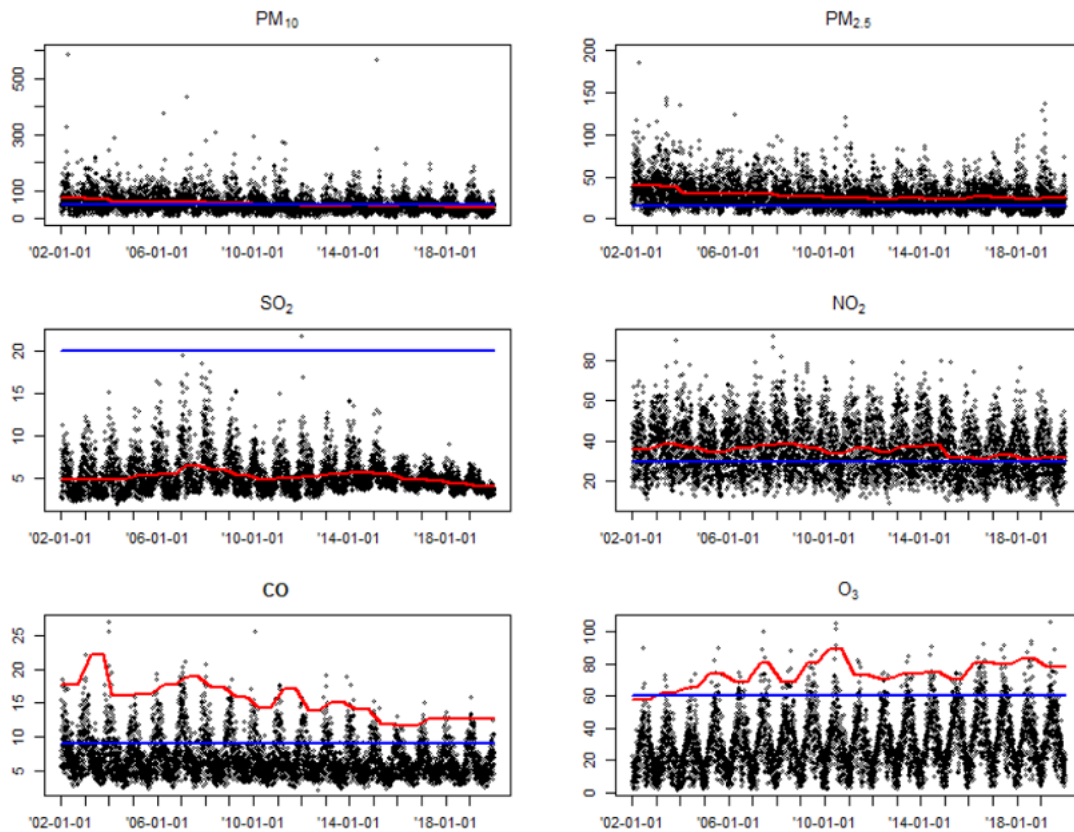


Fig. 1. Daily average concentration of air pollutants using time trends in Seoul, 2002~2019. The blue lines indicate the daily average criteria of air pollutants. The red lines indicate the time trends of air pollutants. CO and O₃ used the results for the average of 8 hours.

로 YLLs이 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 3은 대기오염물질의 IQR 증가 당 손상원인별 YLLs 증가위험도를 나타낸 결과이다. 의도적 손상을 살펴보면, 자살의 경우 NO₂ (4.11년[lag7])와 O₃ (5.26년[lag3]) 농도가 증가할수록 YLLs이 증가하였고, 가해의 경우 PM₁₀ (0.82년[lag4])과 O₃ (1.26년[lag4]) 농도가 증가할수록 YLLs이 증가하였다. 비의도적 손상을 살펴보면, 감전의 경우 NO₂ (0.30년[lag1])의 농도가 증가할수록 YLLs이 증가하였고, 화재의 경우 O₃를 제외한 모든 대기오염물질(PM₁₀: 0.70년[lag6], PM_{2.5}: 0.78년[lag6], SO₂: 1.09년[lag03], NO₂: 1.06년[lag2], CO: 0.99년[lag02])의 농도가 증가할수록 YLLs이 증가하였으며, 중독의 경우 PM_{2.5} (0.32년[lag03])와 NO₂ (0.43년[lag03]) 농도가 증가할수록 YLLs이 증가하였다. 운수사고의 경우 NO₂와 CO를 제외하고 모든 대기오염물질(PM₁₀: -3.71년[lag05], PM_{2.5}: -2.83년[lag07], SO₂: -2.38년[lag7], O₃: -4.30년[lag06])의 농도가 증가할수록 YLLs이 감소하였고, 낙상의 경우 PM₁₀ (0.08년[lag3])과 O₃ (2.00년[lag0])의 농도가 증가할수록 YLLs이 증가하였다. 기계적 힘의 경우 PM₁₀과 SO₂를 제외하고 모든 대기오염물질(PM_{2.5}: -0.38년[lag1], NO₂: -0.63년[lag1], CO: -0.42년[lag4], O₃:

-0.70년[lag3])의 농도가 증가할수록 YLLs이 감소하였고, 익사의 경우 O₃ (-1.72년[lag1]) 농도가 증가할수록 YLLs이 감소하였다.

IV. 고 찰

본 연구는 2002년부터 2019년 동안 서울특별시에서 대기오염과 손상으로 인한 사망환자의 YLLs 간의 연관성을 손상의 의도별로 분석하였다. 그 결과 비의도적 손상의 경우 운수사고, 기계적 힘 및 익사에서 대기오염농도가 증가할수록 YLLs이 감소하였으며, 낙상, 감전, 화재, 중독에서 대기오염농도가 증가할수록 YLLs이 증가하였다. 그리고 의도적 손상의 경우 자해 및 가해에서 대기오염 농도가 증가할수록 YLLs이 증가하였다.

본 연구는 한국에서 처음으로 손상으로 인한 YLLs에 미치는 대기오염물질의 영향을 분석하여 비의도 및 의도적 손상의 원인을 포괄적으로 파악하고자 하였다. 대기오염물질과 손상 간의 연관성에 대한 근거는 여러 선행연구들을 통해 확인할 수 있다. 비의도적 손상 중 낙상에 관한 국외 연구에서 6개의 저소득 및 중소득 국가를 대상으로 낙상과 대기오염물질 간의 연

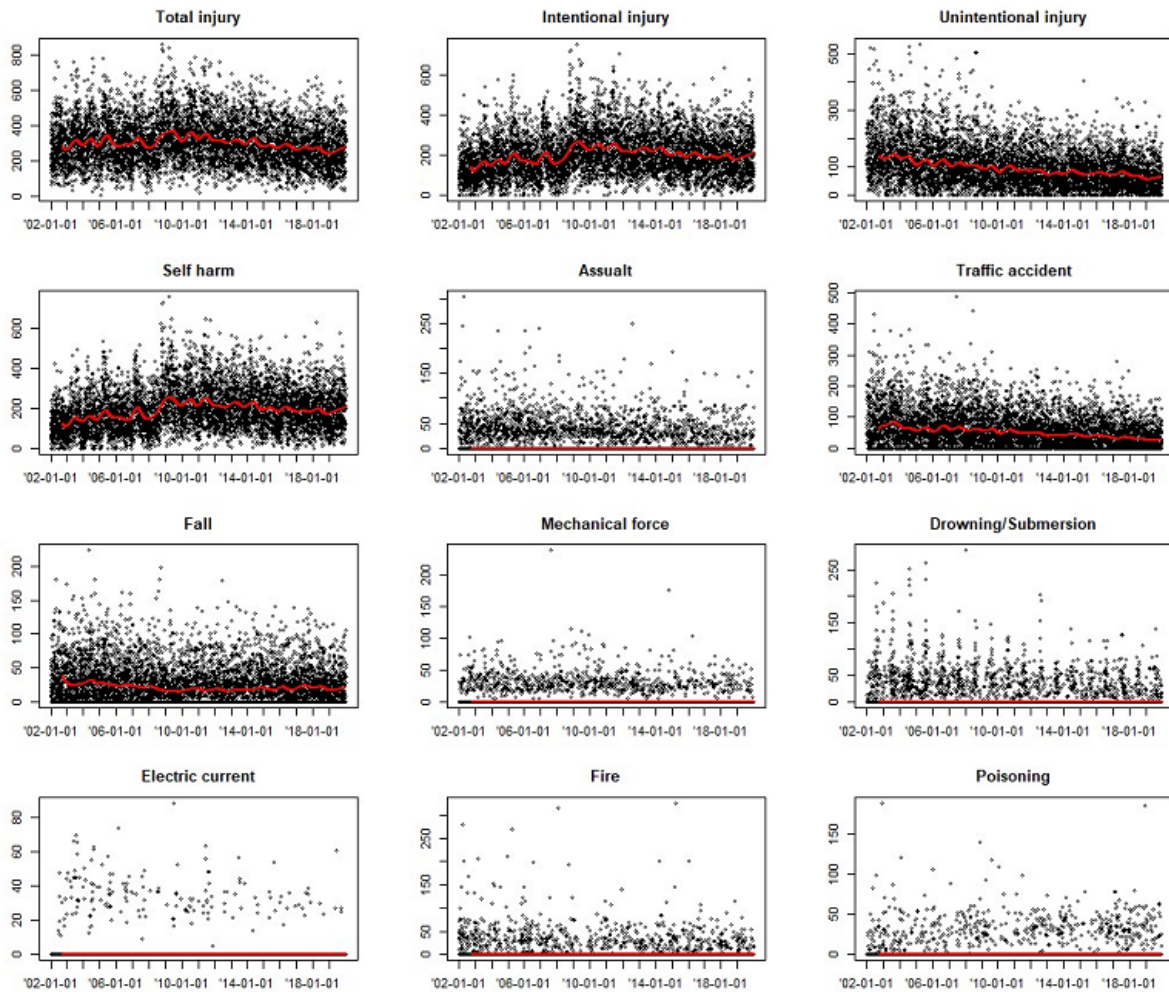


Fig. 2. Daily average of the sum of YLLs using time trends in Seoul, 2002~2019. The red lines indicate the time trends of YLLs due to injury.

관성을 분석한 결과 대기오염물질이 낙상 위험을 증가시켰다고 보고하여 본 연구결과와 일치하였다.²³⁾ 그리고 연구 대상 국가를 한국, 일본, 대만으로 하여 대기오염물질 노출과 자살 간의 연관성을 분석한 연구에서도 대기오염물질 농도가 증가할수록 자살로 인한 사망위험이 증가한다고 보고해 본 연구결과와 일치하였다.²⁴⁾ 하지만 운수사고의 경우 대기오염물질이 증가할수록 YLLs이 감소하여 대기오염물질과 운수사고로 인한 손상 간의 연관성이 있다고 보고한 대만의 선행연구와 차이가 있었다.¹⁰⁾ 연구결과가 일치하지 않는 이유는 해당 선행연구의 경우 응급실 자료를 활용하여 사망자료를 활용한 본 논문과 연구 자료가 다르기 때문으로 보인다. 운수사고의 경우 자동차 안전성 제어장치와 같은 기술 발전으로 1991년 이후 사망자 수가 매년 줄고 있는 추세이고,²⁵⁾ 이러한 발전으로 인해 운수사고 이후 즉각적인 사망으로 이어지지 않을 수 있다. 응급실 방문의 경우에는 운수사고가 발생한 시점에 대기오염영향을 평가할 수 있으나, 사망자료의 경우에는 운수사고가 발생하는 시점과 사망하

는 시점이 다를 수 있기 때문에 대기오염영향을 평가하기 어렵다. 따라서 사망자료로는 운수사고에 대한 대기오염물질의 단기영향을 평가하기에 어려움이 있을 수 있어 선행연구와 상반되는 결과가 나타났을 가능성이 있다.

연구결과 비의도적 손상기전 중 화재, 감전 사고 및 중독에서 대기오염물질 농도가 증가할수록 손상으로 인한 YLLs이 증가하는 것으로 나타났다. 대기오염물질은 주로 흡입을 통해 신체와 중추신경계에 산화 스트레스(oxidative stress)나 전신 및 신경 염증, 신경 퇴화 등의 영향을 미쳐 인지 저하를 일으키는 것으로 알려졌다.²⁶⁾ PM (particulate matter with an aerodynamic diameter)과 O₃ 농도가 지속적으로 높은 멕시코의 개를 대상으로 수행한 실험 연구 결과에 따르면 대기오염물질의 농도가 높은 환경에서 생활하는 개의 전두엽 피질에서 산화적 손상이 발생하였으며 만성 뇌 염증을 나타내는 COX2가 증가하고 신경 기능 장애를 유발하는 아밀로이드전구체단백질(amyloid precursor protein, APP)의 신경 독성의 일부인 Aβ42의 축적이 가

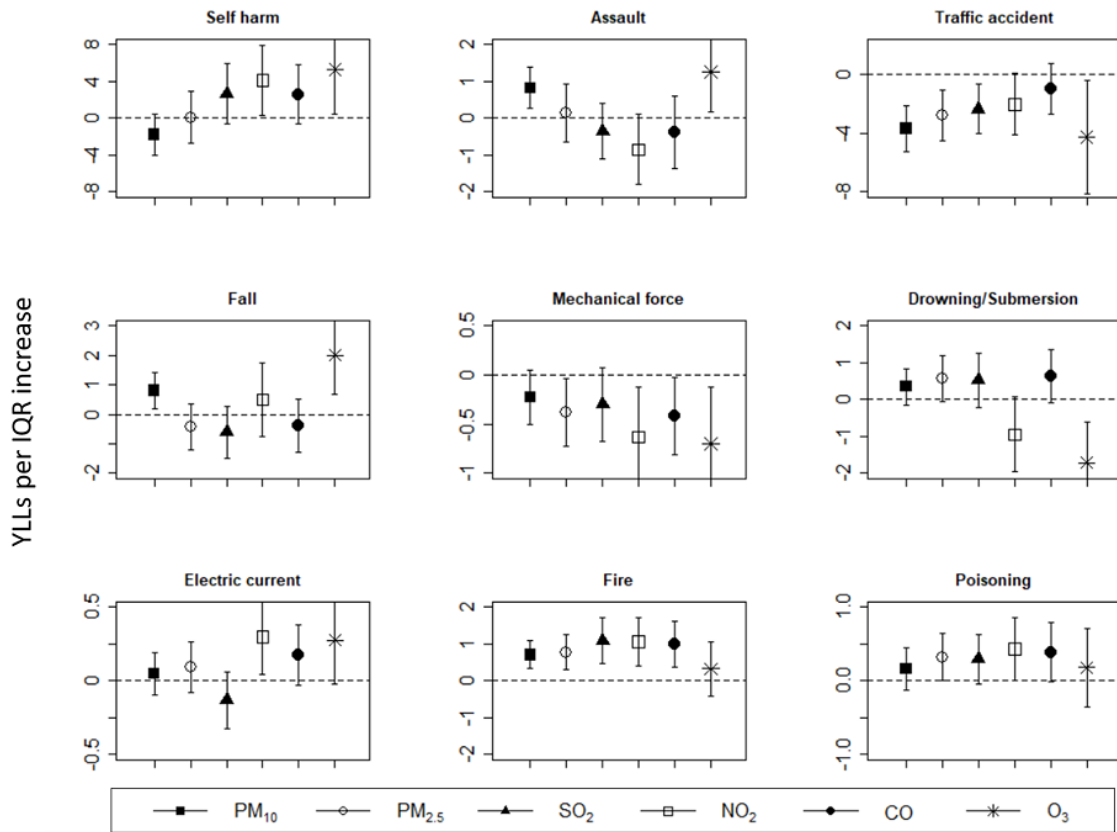


Fig. 3. YLLs and 95% confidence interval for death due to injury associated with an interquartile range increase in air pollutants level at best fitting lag structures.

속화되었다.^{26,27)} 전두엽은 수행능력, 집중, 사고력 등과 밀접한 관련이 있는데²⁸⁾ 전두엽에 손상이 발생할 경우 주의력이 감소하고 인지기능이 저하될 수 있다.²⁹⁾ 또한 여성 노인을 대상으로 수행한 코호트 연구 결과 대기오염물질에 오랫동안 노출되었을 때 전반적인 인지능력, 작업 기억, 언어 기억 및 주의력이 빠르게 감소하였다고 보고한 바 있다.³⁰⁾ 따라서 대기오염물질 노출로 인해 발생할 수 있는 신경학적 장애로 인한 판단력 장애, 실행 기능 장애, 주의력 저하 등 다양한 손상 기전을 통해 비의도적 손상을 일으켰을 가능성이 있다.³¹⁾ 그리고 비의도적 손상별로 유의한 연관성을 나타낸 대기오염물질이 달랐던 이유는 손상이 발생한 상황에 따라 노출 정도가 다르기 때문일 수 있다.

하지만 본 연구에서 비의도적 손상 중 익사, 기계적 힘 및 운수사고에서는 대기오염물질의 농도가 증가할수록 YLLs가 감소하는 경향을 나타내었다. 익사사고는 대부분 물놀이 중 발생하며, 물놀이 익사사고는 6월에서 8월 사이에 집중된다. 이는 특정 시기에 집중하여 발생하는 우발적 사건이기 때문에 대기오염물질의 영향을 평가하는데 한계가 있을 수 있다. 그리고 기계적 힘으로 인한 손상은 물체에 의한 타격, 물체 속이나 사이에 붙잡힘, 으깨짐, 뭉개짐 또는 끼임, 날카로운 물체와의 접촉 등

에 의한 손상을 의미한다. 한국산업안전보건공단의 2019년 산업재해 현황분석 자료에 따르면 사망재해가 주로 제조업에서 이루어지고 있으며, 제조업에서 재해 중 기계적 힘에 의한 재해가 66%를 차지하였다.³²⁾ 이러한 기계적 힘으로 인한 손상은 주로 공장과 같은 실내에서 이루어져 대기오염물질 노출의 단기 영향을 평가하기에 어려움이 있을 수 있다.³³⁾ 그러나 본 연구에서는 직업별로 손상과 대기오염물질 간의 연관성을 살펴보지 못했기 때문에 결과를 해석하는데 한계가 있다. 그러므로 추후 연구에서는 직업별로 손상으로 인한 YLLs에 미치는 대기오염물질의 영향을 파악할 필요가 있다. 운수사고의 경우 위에서 언급한 바와 같이 기술의 발전으로 인해 즉각적인 사망으로 이어지지 않으므로 대기오염물질의 단기노출의 영향이 평가되는데 어려움이 있다.

본 연구결과 자살 및 가해로 인한 YLLs에 대기오염물질이 영향을 미치는 것으로 나타났다. 대기오염물질은 사이토카인(cytokines)과 같은 염증성 매개체를 증가시키고 신경염증 반응을 활성화함으로써 뇌혈관계 손상과 신경퇴행을 야기하여 자살 위험을 증가시키는 것으로 알려져 있다.^{34,35)} 이러한 영향으로 자살로 인한 YLLs가 증가했을 가능성이 있다. 또한 가해의 경

우 대기오염물질이 불안을 증폭시켜 적대적이거나 비윤리적인 행동을 발생시킬 수 있기 때문으로 증가한 것으로 보인다.³⁶⁾

본 연구는 다음과 같은 한계점을 가지고 있다. 본 연구는 연구 대상 지역의 평균 대기오염물질 농도를 활용하여 개인의 노출을 추정하는 준생태학적(semi-ecological) 방법으로 분석을 수행하여 노출 측정 오차가 있을 수 있다.²²⁾ 하지만 노출 측정 오차는 귀무가설로 편향되어 손상과의 연관성을 실제보다 과소 추정하는 경향을 나타낼 수 있다.³⁷⁾ 이러한 오차를 반영하지 못해 측정오류가 발생할 수 있음에도 대기오염물질과 손상과의 연관성을 과대추정하지 않아 연구결과는 유의한 것으로 볼 수 있다. 두 번째로 본 연구는 연구결과에 영향을 줄 수 있는 혼란변수로서 연구대상자의 정신의학적 질병 여부와 같은 사회경제적 지표들을 보정하지 못하였다. 하지만 본 연구는 시계열 분석을 수행하여 단기 영향을 평가해 시간에 따라 변하지 않거나 천천히 변하는 특성의 영향이 통제되어 연구 결과에 많은 영향을 미치지 않았다.²²⁾ 또한 직업별로 손상 위험이 다르며 많은 직업 관련 요인이 손상의 예측인자로 알려져 있다. 손상 위험은 직업에 따라 다르며 해당 작업을 수행하는 위치에 따라 영향을 받는다.³⁸⁾ 그러나 본 연구에서는 직업별로 손상과 대기오염물질 간의 연관성을 살펴볼지 못했다는 한계가 있다. 그러므로 추후 연구에서는 직업을 고려하여 손상으로 인한 YLLs에 미치는 대기오염물질의 영향을 평가할 필요가 있다. 마지막으로 본 연구는 서울특별시만을 대상으로 연구를 수행하여 다른 지역으로 일반화할 때 주의하여야 한다.

V. 결 론

본 연구는 서울특별시의 대기오염물질이 손상으로 인한 YLLs에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과 대기오염물질의 단기노출이 비의도적 손상에서는 낙상, 감전, 화재로 인한 사망의 YLLs 증가에 영향을 미쳤으며 의도적 손상에서는 자살 및 가해로 인한 사망 YLLs 증가에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 예전에는 사고로 인한 손상은 예방이 불가능하다고 인식되었으나 최근에는 예방 가능하다고 인식되고 있으며 안전한 사회를 만들기 위한 효과적인 대응전략이 중요하다. 따라서 손상을 예방하기 위한 대응전략을 수립할 때 대기오염물질이 고려될 필요가 있다. 또한 자살 및 가해는 모두 사회적으로 큰 문제를 야기시킬 수 있으며 정신질환을 가지고 있을 경우 대기오염물질이 더 큰 영향을 미칠 수 있다.³⁹⁾ 따라서 대기오염물질로 인한 악순환이 반복될 가능성을 줄이기 위해 보건학적 관점에서 지속적으로 주의를 기울이고 관심을 가져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 순천향대학교 학술연구비 지원과 2022년도 정부

(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(No. 2022R1C1C1010045).

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Kim KH, Noh MS, Ha ID. A study using HGLM on regional difference of the dead due to injuries. *J Korean Data Inf Sci Soc.* 2011; 22(2): 137-148.
2. Jun S, Park H, Kim UJ, Park H. Disease burden and epidemiologic characteristics of injury in Korea. *J Korean Med Assoc.* 2022; 65(10): 649-654.
3. Lim JG. The OECD ranks first in the mortality rate due to injury, the need to establish systematic preventive measures. Available: <https://www.medicalworldnews.co.kr/m/view.php?id=1498057720> [accessed 10 April 2023].
4. Statistics Korea. Mortality rate by major cause of death. Available: https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1B34E01&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=E1&docId=0150028266&markType=S&itmNm=%EC%A0%84%EA%B5%AD [accessed 29 March 2023].
5. Shin JG. Injury deaths in 2020, accounting for 8.7% of all deaths. Available: <https://www.medworld.co.kr/news/articleView.html?idxno=218009> [accessed 2 April 2023].
6. Air korea. Atmospheric Environmental Standard Material. Available: https://www.airkorea.or.kr/web/airMatter?pMENU_NO=130 [accessed 1 June 2023].
7. Lee J, Oh I, Kim M, Bang JH, Park SJ, Yun SH, et al. Change in the prevalence of allergic diseases and its association with air pollution in major cities of Korea - population under 19 years old in different land-use areas. *J Environ Health Sci.* 2017; 43(6): 478-490.
8. Calderón-Garcidueñas L, Maronpot RR, Torres-Jardon R, Henríquez-Roldán C, Schoonhoven R, Acuña-Ayala H, et al. DNA damage in nasal and brain tissues of canines exposed to air pollutants is associated with evidence of chronic brain inflammation and neurodegeneration. *Toxicol Pathol.* 2003; 31(5): 524-538.
9. Scheers H, Jacobs L, Casas L, Nemery B, Nawrot TS. Long-term exposure to particulate matter air pollution is a risk factor for stroke: meta-analytical evidence. *Stroke.* 2015; 46(11): 3058-3066.
10. Chan TC, Pai CW, Wu CC, Hsu JC, Chen RJ, Chiu WT, et al. Association of air pollution and weather factors with traffic injury severity: a study in Taiwan. *Int J Environ Res Public Health.* 2022; 19(12): 7442.
11. Kim Y, Myung W, Won HH, Shim S, Jeon HJ, Choi J, et al. Association between air pollution and suicide in South Korea: a nationwide study. *PLoS One.* 2015; 10(2): e0117929.
12. Min JY, Kim HJ, Min KB. Long-term exposure to air pollution and

- the risk of suicide death: a population-based cohort study. *Sci Total Environ.* 2018; 628-629: 573-579.
13. Lim J. Korean safety report 2017. Daejeon: Statistics Research Institute; 2019 Apr. Report No.: GOVP1201942330.
 14. Choi EM, Jin HE, Jeong JH. A study on the causes of injury codes by case-based injury code of external causes frequency analysis. *J Korea Inst Inf Electron Commun Technol.* 2023; 16(1): 50-59.
 15. Tak A. Characteristics of death from injury in Koreans. In: Statistics Research Institute. editor. Korean Social Trends 2018. Daejeon: Statistics Korea; 2018. p.289-297.
 16. Shin DH. 72 People a day die from 'injuries', but the prevention management system is insufficient. Available: <http://www.docdocdoc.co.kr/news/articleView.html?idxno=2019860> [accessed 20 April 2023].
 17. Yang J, Ou CQ, Song YF, Li L, Chen PY, Liu QY. Estimating years of life lost from cardiovascular mortality related to air pollution in Guangzhou, China. *Sci Total Environ.* 2016; 573: 1566-1572.
 18. MicroData Integrated Service. Statistical survey on causes of death. Available: <https://mdis.kostat.go.kr/infoData/detailData.do?statsConfmNo=101054> [accessed 5 April 2023].
 19. Lee JY, Song JH, Lim B. Characteristics of suicide by carbon monoxide poisoning in Korea. *J Korean Off Stat.* 2016; 21(1): 57-83.
 20. Statistics Korea. Life table. Available: https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1B42&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=F_29&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=K1&path=%25EB%25B3%25B4%25EA%25B1%25B4%2520%253E%2520%25EC%2583%259D%25EB%25AA%2585%25ED%2591%259C%25EC%2599%2584%25EC%25A0%2584%25EC%2583%259D%25EB%25AA%2585%25ED%2591%259C%281%25EC%2584%25B8%25EB%25B3%2584%29 [accessed 5 April 2023].
 21. Jung J, Lee EM, Myung W, Kim H, Kim H, Lee H. Burden of dust storms on years of life lost in Seoul, South Korea: a distributed lag analysis. *Environ Pollut.* 2022; 296: 118710.
 22. Moon YK, Lee W, Oh S, Kim H, Myung W, Lee H, et al. Emergency department visits for panic attacks and ambient air pollution: a time-stratified case-crossover analysis. *J Korean Neuropsychiatr Assoc.* 2021; 60(3): 213-222.
 23. Guo Y, Lin H, Shi Y, Zheng Y, Li X, Xiao J, et al. Long-term exposure to ambient PM_{2.5} associated with fall-related injury in six low-and middle-income countries. *Environ Pollut.* 2018; 237: 961-967.
 24. Kim Y, Ng CFS, Chung Y, Kim H, Honda Y, Guo YL, et al. Air pollution and suicide in 10 cities in Northeast Asia: a time-stratified case-crossover analysis. *Environ Health Perspect.* 2018; 126(3): 037002.
 25. Ahn JH, Kim JS, Park N. Traffic fatalities fell below 2,000 per year. Available: <https://www.mk.co.kr/news/society/10333765> [accessed 22 April 2023].
 26. Calderón-Garcidueñas L, Calderón-Garcidueñas A, Torres-Jardón R, Avila-Ramírez J, Kulesza RJ, Angiulli AD. Air pollution and your brain: what do you need to know right now. *Prim Health Care Res Dev.* 2015; 16(4): 329-345.
 27. Calderón-Garcidueñas L, Azzarelli B, Acuna H, Garcia R, Gambling TM, Osnaya N, et al. Air pollution and brain damage. *Toxicol Pathol.* 2002; 30(3): 373-389.
 28. Chae JH, Lee KU, Yang WS, Bahk WM, Jun TY, Kim KS. Depression and the frontal lobe. *Korean J Biol Psychiatry.* 2002; 9(2): 95-102.
 29. Lee S. ADHD occurs when frontal lobe function is impaired. Available: <https://www.hankyung.com/news/article/201510077524q> [accessed 1 June 2023].
 30. Weuve J, Puett RC, Schwartz J, Yanosky JD, Laden F, Grodstein F. Exposure to particulate air pollution and cognitive decline in older women. *Arch Intern Med.* 2012; 172(3): 219-227.
 31. Pelicioni PHS, Lord SR, Sturnieks DL, Halmy B, Menant JC. Cognitive and motor cortical activity during cognitively demanding stepping tasks in older people at low and high risk of falling. *Front Med (Lausanne).* 2021; 8: 554231.
 32. Korea Occupational Safety and Health Agency. Industrial accident analysis in 2019. Sejong: Ministry of Employment and Labor; 2021.
 33. Leung DY. Outdoor-indoor air pollution in urban environment: challenges and opportunity. *Front Environ Sci.* 2015; 2: 69.
 34. Bakian AV, Huber RS, Coon H, Gray D, Wilson P, McMahan WM, et al. Acute air pollution exposure and risk of suicide completion. *Am J Epidemiol.* 2015; 181(5): 295-303.
 35. Block ML, Calderón-Garcidueñas L. Air pollution: mechanisms of neuroinflammation and CNS disease. *Trends Neurosci.* 2009; 32(9): 506-516.
 36. Corrigan PW, Watson AC. Findings from the National Comorbidity Survey on the frequency of violent behavior in individuals with psychiatric disorders. *Psychiatry Res.* 2005; 136(2-3): 153-162.
 37. Armstrong BG. Effect of measurement error on epidemiological studies of environmental and occupational exposures. *Occup Environ Med.* 1998; 55(10): 651-656.
 38. Khanzode VV, Maiti J, Ray PK. Occupational injury and accident research: a comprehensive review. *Saf Sci.* 2012; 50(5): 1355-1367.
 39. Dales RE, Cakmak S. Does mental health status influence susceptibility to the physiologic effects of air pollution? A population based study of Canadian children. *PLoS One.* 2016; 11(12): e0168931.

〈저자정보〉

강선우(석사과정), 정수빈(석사과정), 이해원(교수)