

KEI

정책보고서
2019-16

인체위해 저감방안 마련을 위한 미세먼지 구성성분별 건강영향 연구

Study on the Health Effects of PM2.5 Constituents
for Health Risk Reduction Management Plan

배현주 · 이승민 · 정다운 · 오규림 · 김시진 · 이종태

■ 연구진

연구책임자	배현주 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
참여연구원	이승민 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
	정다운 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
	오규림 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
	김시진 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
	이종태 (고려대학교 교수)

■ 연구자문위원 (가나다순)

김유미 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
박정규 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)
박충희 (국립환경과학원 연구관)
양혜란 (서울특별시 보건환경연구원 박사)
한진석 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)

© 2019 한국환경정책·평가연구원

발행인	윤재용
발행처	한국환경정책·평가연구원 (30147) 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 과학·인프라동 전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799 http://www.kei.re.kr
인쇄	2019년 9월 25일
발행	2019년 9월 30일
등록	제 2015-000009호 (1998년 1월 30일)
ISBN	979-11-5980-325-3 93530
인쇄처	세일포커스 02-2275-6894

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.
배현주 외(2019), 「인체위해 저감방안 마련을 위한 미세먼지 구성성분별 건강영향 연구」, 한국환경정책·평가연구원.

값 7,000원

서 언

최근 많은 국민들이 미세먼지로 인한 스트레스가 증가하고 심각한 사회적 문제로 대두됨에 따라 미세먼지에 인한 문제가 ‘사회재난’으로 규정되었습니다. 정부는 국민의 건강보호를 위해 미세먼지 문제를 해결하고자 2019년 11월 미세먼지 관리 종합계획을 마련하고 2024년까지 2016년 대비 미세먼지 연평균 농도 35% 이상을 저감하고자 계획했습니다.

국민의 건강을 보다 효과적으로 보호하기 위해서는 미세먼지뿐만 아니라 구성성분의 건강영향 평가가 필요하며 최근 미국과 유럽 등에서는 미세먼지의 구성성분별 건강영향 연구를 진행하고 있습니다.

우리나라도 건강과의 연관성이 높은 미세먼지 구성성분을 파악하고, 해당 구성성분을 배출하는 주요 배출원을 우선적으로 관리하는 질적 관리가 필요한 시점입니다. 이에 미세먼지 구성성분에 따른 사망영향을 정량적으로 평가하고 수용체 중심의 인체위해 저감을 위한 미세먼지 관리 방안을 제시한 본 연구는 시의적절하다고 볼 수 있습니다. 본 연구가 미세먼지 구성성분별 건강영향 평가 연구의 시작 단계에서 나아갈 방향을 제시하고 향후 미세먼지의 질적 관리에 있어 중요한 정책 자료가 될 것으로 기대합니다.

끝으로 본 연구의 책임을 맡아 수행해 주신 기후대기안전연구본부 환경위해연구실 배현주 박사의 노고에 감사드리며, 연구진으로 참여해 주신 이승민 박사, 정다운 박사, 오규림 연구원, 김시진 연구원, 고려대학교 이종태 교수께 감사를 표합니다. 바쁘신 와중에도 전문성 있는 자문과 조언을 통해 연구에 도움을 주신 국립환경과학원 박충희 연구관, 서울특별시 보건환경연구원 양혜란 박사께 깊은 감사를 드립니다. 또한 우리 원의 김유미 박사, 박정규 박사, 한진석 박사의 자문에도 감사를 표합니다.

2019년 9월

한국환경정책·평가연구원

원장 윤제용

■ 요약

I. 연구 배경 및 목적

□ 연구 배경 및 필요성

- 우리나라는 1990년대 중반 이후 급격한 경제발전과 산업화, 그리고 도시화로 인한 인위적 대기오염물질의 배출량이 증가함
 - 대기질을 개선하고 대기오염으로 인한 건강부담을 경감시키고자 국가적인 차원에서 다양한 환경정책들을 시행
- 미세먼지(PM_{2.5})는 입자의 크기 2.5 μ m 이하로 매우 작아 폐포까지 깊숙이 침투하여 인체 위해성이 높은 것으로 보고
- 미세먼지(PM_{2.5})의 발생원과 구성성분에 따라 건강위해성에 차이가 있으므로, 인체 위해 측면의 관리를 위해서는 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분에 따른 건강영향에 대한 과학적 근거가 필요

□ 연구목적

- 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 특성을 파악하고, 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 따른 건강영향을 정량적으로 평가
- 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 따른 건강영향의 관련성을 파악하여, 인체 위해성이 높은 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 대한 우선적 관리정책을 마련할 수 있도록 미세먼지(PM_{2.5}) 질적 관리정책 방안 제안

II. 미세먼지의 구성성분 및 건강영향 사례연구

- 미세먼지(PM_{2.5})는 50개 이상의 화학적 성분의 복합 혼합물로, 발생원에 따라 미세

먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 차이

- 탄소성분(EC, OC), 금속성분(Al, Ba, Be, Ca²⁺, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg²⁺ 등), 이온성분(NO₃⁻, SO₄²⁻, NH⁺, Cl⁻, Br⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) 등 다양한 물질들로 구성
- 국내 미세먼지(PM_{2.5})의 주요성분은 질산염, 황산염, 암모늄, 유기탄소, 원소탄소로 나타났으며 지역별로 각 주요성분들이 차지하는 비율은 상이
 - 서울, 인천과 광주의 경우 유기탄소가 가장 큰 비중을 차지하였고, 대전, 부산, 청주 등의 도시에서는 황산염의 비중이 가장 큰 것으로 나타남
 - 미세먼지(PM_{2.5}) 발생 기여도 분석에 있어 상이한 방법론을 적용하였으며 오염원의 분포는 계절이나 기상현상에 따라 달라지는 것으로 나타남

□ 미국과 유럽의 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 건강영향 연구 사례 분석

- 미국 건강영향연구소(HEI: Health Effects Institute)는 미세먼지 구성성분에 의한 건강영향에 대한 통합적 역학 및 독성 연구 등 4개의 연구로 구성
 - 시계열 분석 결과 미세먼지(PM_{2.5})와 가스상 오염 물질의 성분은 미세먼지(PM_{2.5}) 질량 농도와 같이 건강영향에 밀접한 연관성을 보임
- 미국 국가대기환경기준의 통합과학평가(ISA: Integrated Science Assessment)는 미세먼지(PM_{2.5}) 구성 성분과 사망률 관계에 대한 검토에서 미세먼지(PM_{2.5}) 질량과 비교하여 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 농도와 비율에 의한 사망률과 관련성 확인
- 유럽 MED-PARTICLES은 2010년부터 2013년까지 유럽위원회의 지원을 받아 지중해 연안 국가 14개 도시의 미세먼지 구성성분의 특성을 파악

□ 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 단기노출에 의한 건강영향 연구

- 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 위험도는 지역이나 사망원인, 질병원인, 계절 등에 따라 달라지는 것으로 보고

Ⅲ. 미세먼지 구성성분의 특성분석

- 서울시 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 특성 파악
 - 2015~2017년 서울시 미세먼지(PM_{2.5})의 연평균 농도 값은 2016년에 26.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았음
 - 서울시 북동지역의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도분포가 다른 지역보다 낮은 패턴을 보였으며 남서지역의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 다른 지역보다 높은 패턴을 보임
- 2015년과 2016년의 배출원별 전국과 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 배출특성 파악
 - 전국 미세먼지(PM_{2.5}) 총배출량은 2015년 98,806톤에서 2016년 100,247톤으로 증가한 반면 서울시의 경우 2015년(2,580톤)보다 2016년(2,524톤) 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량이 다소 감소
- 2015년부터 2017년까지 서울시 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분(탄소성분(OC, EC), 수용성 이온성분(NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺), 금속이온성분(Ca²⁺, K⁺, Na⁺, Mg²⁺)의 특성 파악
 - 미세먼지(PM_{2.5})대비 비율을 살펴보면 탄소성분의 OC 비율이 평균 26%로 가장 높았으며 이온성분의 NO₃⁻(20.54%)와 SO₄²⁻(16.57%)의 비율이 다음으로 높게 나타남
 - OC의 계절별 변화는 겨울(7.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 봄(6.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 가을(6.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 여름(5.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타남
 - 미세먼지(PM_{2.5})와 비교적 높은 상관성(0.5이상)을 보인 것은 이온성분으로 중 NO₃⁻(0.57)과 Cl⁻(0.84)이었으며 금속 이온성분 중 K⁺(0.79), Mg²⁺(0.65), Na⁺(0.67)임

Ⅳ. 미세먼지 구성성분별 건강영향 평가

- 2015년부터 2017년까지 서울시를 대상으로 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 농도 증가로 인한 사망영향을 평가
 - 미세먼지의 구성성분에 따른 전체원인 사망영향과 심혈관계 사망영향을 정량적으로

평가하기 위해 시계열 연구를 적용

- 미세먼지 구성성분 : EC, OC, NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{2+} , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , Na^+
- 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 구성성분 중 EC와 OC는 전체 연령과 65세 이상 연령집단에서 전체 원인 사망위험을 통계적으로 유의하게 높임
- EC와 OC의 전체원인 사망위험은 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 사망위험보다 높게 나타남
- Cl^- 과 SO_4^{2-} 는 65세 미만 연령집단에서 전체원인 사망위험과 심혈관계 사망위험을 통계적으로 유의하게 높임
- Mg^{2+} 전체 연령과 65세 이상연령에서 전체원인 및 심혈관계 사망위험을 유의하게 높임

V. 수용체 중심의 미세먼지 관리정책 방안

□ 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리정책 국외 사례 검토

- 미국 남부 캘리포니아 지역은 대기자원위원회(California Air Resources Board)를 설립하여 자동차 배기가스를 규제. BC 농도가 1960년 대 이후 90% 가까이 감소하면서 매년 약 5,000명의 조기 사망을 예방
- 유럽연합은 대기환경 관리 및 대기질 개선을 위해 2001년 국가별 배출량 상한 지침(National Emission Ceilings Directive)을 채택하고 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 배출 저감 조치를 취할 때 건강피해를 야기하는 블랙카본(Black Carbon) 검토를 명시

□ 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리로 패러다임의 전환

- 미세먼지 관리가 국민의 건강피해를 감소시키고 쾌적한 환경을 조성하기 위한 것으로 목적을 달성하기 위해서는 우선적으로 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리로 패러다임의 전환 필요

□ 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리방안의 도입

- 미세먼지와 구성성분의 측정 및 정보제공

- 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 농도를 측정하기 위해서는 막대한 자원과 전문 인력이 필요하지만, 미세먼지 관리의 기본적인 요소인 구성성분 정보를 파악하기 위해서는 구성성분 측정이 반드시 필요
- 구성성분과 같이 세분화되고 과학적인 사용이 필요한 항목에 대해서는 별도의 정보 제공이 이루어질 수 있어야 함
- 미세먼지와 구성성분의 건강영향 평가
 - 미세먼지(PM_{2.5})에 대한 양적인 관리뿐만 아니라 질적 관리를 위해 미세먼지(PM_{2.5}) 배출원의 배출요인, 배출량, 구성성분별 농도 특성이 분석되어야 하며 이를 통한 인구집단의 미세먼지(PM_{2.5}) 노출과 위해도 분석 필요
- 인체위해 저감을 위한 배출원 맞춤형 관리대책 추진
 - 미세먼지(PM_{2.5})와 구성성분에 대한 기여도를 고려하여 관리대책의 추진 가능 범위를 확인. 배출원의 위치, 배출오염물질과 같은 다양한 제한요인을 고려하여 지역별 배출원 맞춤형 관리대책 추진
 - 국내에 타당한 분석방법을 적용하여 다양한 미세먼지(PM_{2.5})의 배출원 기여도를 보다 정확하게 평가할 필요가 있음

주제어 : 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분, 건강영향, 인체 위해성, 미세먼지 관리정책

| 차례 |

요 약	i
제1장 서론	1
1. 연구배경 및 필요성	1
2. 연구범위	3
제2장 미세먼지의 구성성분 및 건강영향 사례 연구	4
1. 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분 특성	4
2. 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분의 건강영향 연구 사례	11
3. 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분의 건강영향 연구	19
제3장 미세먼지 구성성분의 특성 분석	22
1. 미세먼지(PM _{2.5}) 농도 특성	22
2. 미세먼지(PM _{2.5}) 배출 특성	26
3. 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분별 특성	32
제4장 미세먼지 구성성분의 건강영향 평가	36
1. 건강영향 평가의 분석 자료 및 분석 방법	36
2. 기본 자료에 대한 분석	39
3. 미세먼지(PM _{2.5})와 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분의 사망영향	42
제5장 수용체 중심의 미세먼지 관리정책방안	59
1. 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리정책 국외 사례	59

2. 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리로 패러다임의 전환	64
3. 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리방안의 도입	65
4. 인체위해 저감을 위한 배출원 맞춤형 관리대책 추진	70
제6장 요약 및 결론	72
1. 요약	72
2. 결론	74
참고문헌	77
Executive Summary	85

| 표 차례 |

〈표 2-1〉 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분	4
〈표 2-2〉 서울시의 미세먼지(PM _{2.5}) 및 구성성분의 비율	5
〈표 2-3〉 국내 미세먼지(PM _{2.5}) 주요 구성성분의 미세먼지 기여율	7
〈표 2-4〉 미세먼지(PM _{2.5}) 발생에 대한 국내요인 관련 연구내용	9
〈표 2-5〉 미세먼지센터의 미세먼지에 의한 건강영향 연구	12
〈표 2-6〉 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분에 단기노출에 의한 건강영향 연구	14
〈표 2-7〉 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분의 건강영향 연구	21
〈표 3-1〉 2015~2017년 서울시 구별 미세먼지(PM _{2.5}) 기본통계량	23
〈표 3-2〉 2015~2016년 전국 및 서울시 배출원별 미세먼지(PM _{2.5}) 배출량	27
〈표 3-3〉 2015~2016년 서울시 구별 미세먼지(PM _{2.5}) 총배출량 및 비율	28
〈표 3-4〉 2015~2017년 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분의 기초통계량	33
〈표 3-5〉 2015~2017년 계절별 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분의 기초통계량	34
〈표 3-6〉 2015~2017년 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분의 상관관계	35
〈표 4-1〉 2015~2017년 기상자료의 기초통계량	39
〈표 4-2〉 2015~2017년 사망자료의 기초통계량	41
〈표 4-3〉 미세먼지(PM _{2.5})의 사망원인별 사망영향	43
〈표 4-4〉 EC의 사망원인별 사망영향	44
〈표 4-5〉 OC의 사망원인별 사망영향	46
〈표 4-6〉 Ca ²⁺ 의 사망원인별 사망영향	47
〈표 4-7〉 Cl ⁻ 의 사망원인별 사망영향	48
〈표 4-8〉 K ⁺ 의 사망원인별 사망영향	50
〈표 4-9〉 Mg ²⁺ 의 사망원인별 사망영향	51
〈표 4-10〉 Na ⁺ 의 사망원인별 사망영향	52
〈표 4-11〉 NH ₄ ⁺ 의 사망원인별 사망영향	54

〈표 4-12〉 NO ₃ ⁻ 의 사망원인별 사망영향	55
〈표 4-13〉 SO ₄ ²⁻ 의 사망원인별 사망영향	57
〈표 5-1〉 2005년 대비 유럽연합 28개국의 대기오염물질별 저감비율	62
〈표 5-2〉 유럽 대기질 기본지침 미세먼지(PM _{2.5}) 측정 시 구성성분	65

| 그림차례 |

〈그림 1-1〉 연구의 틀	3
〈그림 2-1〉 배출원별 미세먼지 입자 크기의 비율	8
〈그림 2-2〉 배출원별 미세먼지(PM _{2.5}) 성분 및 가스상 오염물질의 factor loading	13
〈그림 2-3〉 미세먼지(PM _{2.5}) 성분별 계절별 전체사망 초과위험	13
〈그림 2-4〉 “MED-PARTICLES” 프로젝트 참여 지중해 지역 도시	16
〈그림 2-5〉 “MED-PARTICLES” 프로젝트 대상지역별 미세먼지 구성성분 농도	17
〈그림 2-6〉 미세먼지 구성성분의 사망증가율	18
〈그림 2-7〉 미세먼지(PM _{2.5})와 미세먼지(PM _{2.5}) 구성성분의 사망증가율	19
〈그림 3-1〉 서울시 도시대기측정망 지점	22
〈그림 3-2〉 2015~2017년 서울시 구별 미세먼지(PM _{2.5}) 농도	24
〈그림 3-3〉 2015~2017년 서울시 미세먼지(PM _{2.5}) 농도 분포	25
〈그림 3-4〉 2015~2016년 전국 및 서울시 배출원별 미세먼지(PM _{2.5}) 배출량 비교	26
〈그림 3-5〉 2015~2016년 서울시 배출원별 미세먼지 배출량	29
〈그림 3-6〉 2015~2016년 서울시 구별 미세먼지(PM _{2.5}) 총배출량	31
〈그림 4-1〉 미세먼지(PM _{2.5})의 사망원인별 영향	42
〈그림 4-2〉 EC의 사망원인별 영향	44
〈그림 4-3〉 OC의 사망원인별 영향	45
〈그림 4-4〉 Ca ²⁺ 의 사망원인별 영향	46
〈그림 4-5〉 Cl ⁻ 의 사망원인별 영향	48
〈그림 4-6〉 K ⁺ 의 사망원인별 영향	49
〈그림 4-7〉 Mg ²⁺ 의 사망원인별 영향	50
〈그림 4-8〉 Na ⁺ 의 사망원인별 영향	52
〈그림 4-9〉 NH ₄ ⁺ 의 사망원인별 영향	53
〈그림 4-10〉 NO ₃ ⁻ 의 사망원인별 영향	54

〈그림 4-11〉 SO ₄ ²⁻ 의 사망원인별 영향	56
〈그림 4-12〉 미세먼지(PM _{2.5}), EC, OC의 사망위험	58
〈그림 5-1〉 유럽연합의 미세먼지(PM _{2.5})와 블랙카본 배출(2030년 예상)	63
〈그림 5-2〉 유럽연합 농촌 배경농도 지점별 미세먼지(PM _{2.5})의 EC 농도	66
〈그림 5-3〉 인체위해 저감을 위한 미세먼지 건강영향 연구	68

제1장

서론

1. 연구배경 및 필요성

우리나라는 1900년대 중반 이후 급격한 경제발전과 산업화, 그리고 도시화로 인해 인위적 대기오염물질의 배출량이 증가함에 따라 2000년 초반까지 대기오염 농도가 증가하였다. 대기오염과 건강영향의 연관성을 연구하는 다수의 국내외 역학연구들을 통하여 대기오염과 질병 및 사망과의 연관성이 지속적으로 규명되면서 대기질을 개선하고 대기오염으로 인한 건강부담을 경감시키고자 국가적인 차원에서 다양한 환경정책이 시행되었다. 미세먼지(PM_{2.5})는 입자의 크기가 2.5 μm 이하로 매우 작아 폐포까지 깊숙이 침투하여 인체위해성이 높은 것으로 보고되었으며,¹⁾ 미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 높아지면 호흡기계와 심혈관계 관련 질환의 증가뿐 아니라 조기사망 발생위험이 증가한다고 보고되었다.²⁾

미세먼지(PM_{2.5})는 50개 이상의 화학적 성분의 복합 혼합물로, 다양한 오염원에서 배출되는 입자상 물질을 총칭하며 탄소화합물(carbonaceous components), 미세금속물질(trace metal), 이온 성분(ionic components) 등 다양한 물질로 구성되어 있다.³⁾ 즉, 미세먼지(PM_{2.5})를 배출하는 오염원의 분포에 따라 미세먼지(PM_{2.5})를 구성하는 물질들의 분포가 지역과 시간에 따라 달라질 수 있으며, 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분별 건강영향 평가를 통해 미세먼지(PM_{2.5})로 인한 건강영향이 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 기여율에 따라 달라질 수 있다는 가설이 제기되고 있다.³⁾

1) HEI(2013), pp.31-35.

2) U.S. EPA(2018), pp.11-43.

3) Krall et al.(2013), pp.1148-1153.

미세먼지(PM_{2.5})의 발생원과 구성성분에 따라 건강위해성에 차이가 있으므로 인체위해 측면의 관리를 위해서는 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분에 따른 건강영향에 대한 과학적 근거가 필요하다.

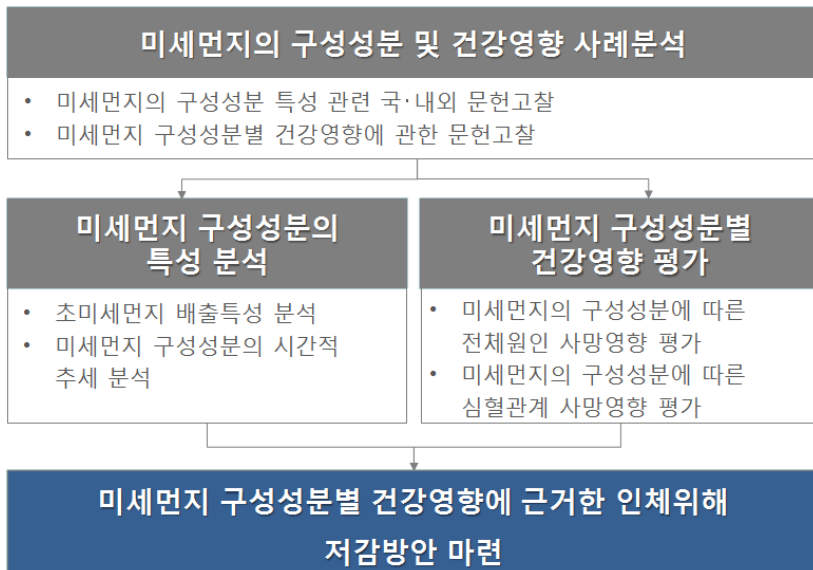
정부는 체계적인 미세먼지 저감과 관리 대책을 위하여 2017년 『미세먼지 관리 종합대책』을 마련하였으며 “과학적인 연구기반 강화로 미세먼지 대응역량 제고” 추진전략을 마련하였다. 그러나 실질적으로 추진과제에 있어 수용체 중심의 건강영향을 고려한 미세먼지 관리정책은 미흡한 상황이다. 인체위해를 저감시키기 위한 환경정책을 마련하기 위해서는 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 특성과 구성성분에 따른 건강영향을 파악하고, 이를 토대로 국민 건강 보호를 위한 수용체 중심의 미세먼지(PM_{2.5}) 관리정책을 마련할 수 있다.

본 연구에서는 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 특성을 파악하고, 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 따른 건강영향을 정량적으로 평가하여 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분별 건강영향에 대한 과학적 근거를 마련하고자 한다. 또한 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 따른 건강영향의 관련성을 파악하여, 인체위해성이 높은 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 대한 우선적 관리정책을 마련할 수 있도록 미세먼지(PM_{2.5}) 질적 관리정책방안을 제안하고자 한다.

2. 연구범위

본 연구의 목적은 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 특성을 파악하고, 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 따른 건강영향을 정량적으로 평가하며 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 따른 건강영향의 관련성을 파악하여, 인체위해성을 저감시키기 위한 미세먼지(PM_{2.5}) 질적 관리정책방안을 마련하는 것이다. 본 연구의 틀은 <그림 1-1>과 같다.

연구 1단계에서는 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분과 건강영향에 대한 연구 사례를 고찰하였다. 2단계에서는 서울시를 대상으로 미세먼지(PM_{2.5}) 농도, 배출량 특성을 파악하고 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 특성을 파악하였다. 3단계에서 2단계에서 구축한 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 따른 사망원인별 사망영향을 정량적으로 평가하였다. 마지막에는 2, 3, 4 단계에서 검토하고 분석한 내용을 토대로 수용체 중심의 인체위해 저감을 위한 미세먼지(PM_{2.5}) 관리 방안을 제시하였다.



자료: 저자 작성.

<그림 1-1> 연구의 틀

제2장

미세먼지의 구성성분 및 건강영향 사례 연구

1. 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 특성

미세먼지(PM_{2.5})는 50개 이상의 화학적 성분의 복합 혼합물로, 발생원에 따라 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 차이가 있다.³⁾ 미세먼지(PM_{2.5})는 자연적인 발생보다는 인위적인 발생원에서 배출되어 생성되는 오염물질들이 많은 양을 차지하며 상당량이 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 암모니아(NH₃), 휘발성 유기화합물(VOCs) 등의 전구물질이 대기 중의 특정 조건에서 반응하여 2차 생성된다.⁴⁾ 미세먼지(PM_{2.5})의 대표적인 화학적 성분은 <표 2-1>과 같으며, 원소탄소와 유기탄소 등의 탄소성분과 황산염, 질산염 등 이온성분, 납, 비소, 칼슘 등의 금속성분이 있다.

<표 2-1> 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분

구분	주요 화학적 성분
질량	PM mass (Quartz)
탄소성분	EC(Elemental carbon, 원소탄소), OC(Organic Carbon, 유기탄소)
이온성분	NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , Br ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺
금속성분	Al, Ba, Be, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni Pb, V, Zn, As, Hg and Se

자료: Yang et al.(2018).

미세먼지(PM_{2.5})는 자연 발생되는 1차적 대기오염물질과 2차적 생성으로 인한 대기오염

4) 에어코리아, “대기오염물질”, 검색일: 2019.9.6.

물질로 구성되며, 고농도 사례에서는 2차 대기오염물질의 비중이 높아 미세먼지(PM_{2.5}) 농도를 감소시키기 위해서는 미세먼지(PM_{2.5})의 배출뿐 아니라 이를 생성하는 전구물질의 배출도 함께 줄여야 한다.⁵⁾ 국내에서 이루어진 연구에서 서울시의 미세먼지(PM_{2.5})와 구성성분 간의 질량 및 비율을 살펴보면 <표 2-2>와 같다. 김종희 외(2014)⁶⁾의 연구는 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 고농도 기간 중에 관측된 미세먼지(PM_{2.5}) 농도와 구성성분의 비율을 분석하였으며, 이외 연구는 연구기간 동안 서울시에서 관측된 미세먼지(PM_{2.5}) 질량과 구성성분의 특성을 파악하였다. 화학적 구성성분을 보면 탄소성분으로 원소탄소가 차지하는 비율이 높게 나타났으며 황산염, 질산염 등의 이온성분이 미세먼지(PM_{2.5}) 질량농도의 많은 부분을 차지하고 있다. 특히 미세먼지(PM_{2.5}) 고농도 기간의 경우 황산염과 질산염이 미세먼지(PM_{2.5}) 질량농도에서 차지하는 비율이 다른 때보다 높았으며 보통의 기간 동안에는 원소탄소가 미세먼지(PM_{2.5}) 질량농도에서 차지하는 비율이 높게 나타났다. 서울시에서 대기중 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 농도의 장기 변동추이를 분석한 연구결과에 따르면, 탄소성분 중 화석연료와 생물연소 과정에서 주로 발생하는 성분인 원소탄소의 경우 감소하는 추세를 보였으며, 이는 그동안 시행된 환경정책(고체연료 사용 제한 및 금지, 경유 버스를 천연가스 버스로 교체 및 디젤차량 매연저감장치 설치 등)의 영향 때문일 것으로 보고하였다.⁷⁾

<표 2-2> 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 및 구성성분의 비율

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	김종희 외. (2014)	Kang et al. (2006)	김용표 (2006)		Kim et al. (2007)
	2014.2.24~27	2001	2001.4~2002.2	2003.3~2005.5	2003.3~2005.5
SO ₄ ²⁻	16.52(23.3%)	6.46(13%)	6.42(13%)	8.16(19%)	7.5(18%)
NO ₃ ⁻	17.23(24.3%)	7.59(16%)	7.78(16%)	7.64(18%)	7.1(17%)
NH ₄ ⁺	10.89(15.4%)	3.26(4.7%)	3.3(6.7%)	5.57(13%)	5.5(13%)
OC	7.89(11.1%)	12.8(26.4%)	13.1(26.3%)	10.2(23.3%)	10.2(23.8%)
EC	2.73(3.9%)	5.98(12%)	5.95(12%)	4.29(9.6%)	4.1(9.6%)
PM _{2.5}	70.92	48.5	49.6	43.64	42.8

자료: 김용표(2006), pp.535-553; Kang et al.(2006), pp.911-921; Kim et al.(2007), pp.6762-6770; 김종희 외(2014), pp.82-99.

5) 김용표(2017), pp.191-204.

6) 김종희 외(2014), pp.82-99.

7) 한상희, 김용표(2015), pp.143-156.

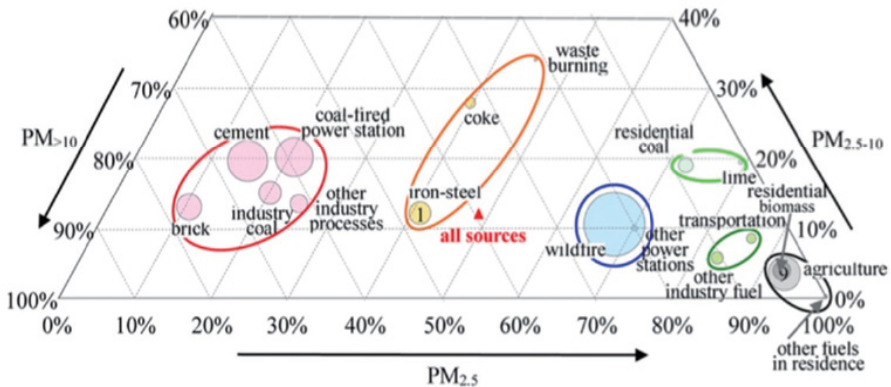
국내 미세먼지 구성성분의 미세먼지 기여율은 <표 2-3>과 같으며, 국내 미세먼지($PM_{2.5}$)의 주요성분은 질산염, 황산염, 암모늄, 유기탄소, 원소탄소로 나타났고 지역별로 각 주요성분들이 차지하는 비율은 상이하였다. 서울, 인천과 광주의 경우 유기탄소가 가장 큰 비중을 차지하였으나, 대전, 부산, 청주 등의 도시에서는 황산염의 비중이 가장 큰 것으로 나타났다. 서울의 경우 원소탄소 성분의 비중은 1998~1999년 17%에서 2003~2006년 7%로 감소하는 시계열적 패턴을 보이고 있다.

〈표 2-3〉 국내 미세먼지(PM_{2.5}) 주요 구성성분의 미세먼지 기여율

지역	PM	분석기간	주요성분	출처	기타
서울	PM _{2.5}	1998-1999	NO ₃ ⁻ (13%), SO ₄ ²⁻ (17%), NH ₄ ⁺ (10%), OC(26%), EC(17%), S(5%)	Park and Kim (2005)	최근 연도로 올수록 이온 증가, EC 감소
		2002-2004	NO ₃ ⁻ (16%), SO ₄ ²⁻ , NH ₄ ⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺	Han et al. (2008)	
		2003-2005	NO ₃ ⁻ (17%), SO ₄ ²⁻ (18%), NH ₄ ⁺ (13%), OC(24%), EC(1%), Σtrace elements(11%)	Kim et al. (2007)	
		2003-2006	NO ₃ ⁻ (16%), SO ₄ ²⁻ (18%), NH ₄ ⁺ (12%), OC(24%), EC(7%)	Heo et al. (2009)	
	PM ₁₀	2006-2007	NO ₃ ⁻ (12%), SO ₄ ²⁻ (13%), NH ₄ ⁺ (9%), OC(15%), EC(4%), Si(3%)	Yi and Hwang (2014)	
인천	PM _{2.5}	2009-2010	NO ₃ ⁻ (11%), SO ₄ ²⁻ (12%), NH ₄ ⁺ (8%), OC(19%), EC(4%)	Choi et al. (2012)	
대전	PM ₁₀	2000-2002	NO ₃ ⁻ (8%), SO ₄ ²⁻ (11%), NH ₄ ⁺ (6%)	Lim et al. (2010)	
광주	PM _{2.5}	2001-2002	NO ₃ ⁻ (10%), SO ₄ ²⁻ (20%), OC(30%), EC(11%)	Lee et al. (2008)	타 지역에 비해 OC 비중이 큼
부산	PM _{2.5}	2013	NO ₃ ⁻ (11%), SO ₄ ²⁻ (30%), NH ₄ ⁺ (14%), OC(15%), EC(5%)	Jeong et al. (2017)	타 지역에 비해 SO ₄ ²⁻ 비중이 큼
청주	PM _{2.5}	1995-1996	NO ₃ ⁻ (8%), SO ₄ ²⁻ (19%), NH ₄ ⁺ (6%), OC(11%), EC(10%)	Lee and Kang (2001)	
수원	Total PM	2005-2007	NO ₃ ⁻ (10%), SO ₄ ²⁻ (11%), NH ₄ ⁺ (4%)	Oh et al. (2011)	
경산	PM _{2.5}	2010-2012	NO ₃ ⁻ (14%), SO ₄ ²⁻ (17%), NH ₄ ⁺ (9%)	정영진, 황인조 (2015)	

자료: Lee and Kang(2001), pp.739-746; Park and Kim(2005), pp.217-226; Kim et al.(2007), pp.6762-6770; Lee et al.(2008), pp.199-211; Han et al.(2008), pp.4735-4746; Heo et al.(2009), pp.495-497; Lim et al.(2010), pp.88-100; Oh et al.(2011), pp.247-264; Choi et al.(2012), pp.583-592; Yi and Hwang(2014), pp.115-125; 정영진, 황인조(2015), pp.508-519; Jeong et al.(2017), pp.115-127.

미세먼지의 배출원은 <그림 2-1>과 같이 다양하며 주요 배출원은 요리, 난방, 운송 연료의 산화, 농업용, 주거용 바이오매스 연소와 관련되어 있고, 바이오매스의 다른 형태, 나무 연소를 포함한 산화 과정과 연관된다.⁸⁾ 또한 산업용 연료의 사용은 미세먼지(PM_{2.5}) 비율이 약 80% 정도로 높은 편이었으며, 석탄화력 발전은 최대 40% 수준, 시멘트 산업의 경우도 최대 35% 정도 수준의 미세먼지(PM_{2.5})를 배출한다.⁸⁾



자료: Huang et al.(2014), pp.13834-13843.

<그림 2-1> 배출원별 미세먼지 입자 크기의 비율

국내 미세먼지(PM_{2.5}) 발생원에 대한 다양한 연구가 이루어졌으며, 국내에서 이루어진 연구는 미세먼지(PM_{2.5})의 성분측정을 통한 기여도 분석으로 요인을 파악한 연구가 주를 이룬다. 미세먼지(PM_{2.5}) 발생과 관련한 연구들은 관측 지점과 시점에 차이가 있으며, 기여도 분석에 있어 상이한 방법론을 적용하였다. 미세먼지(PM_{2.5}) 발생에 대한 국내요인 관련 연구 내용은 <표 2-4>와 같다. 문광주 외(2011),⁹⁾ 진형아 외(2012)¹⁰⁾는 미세먼지(PM_{2.5}) 발생의 주요 오염원으로 연료 연소가 각 40%, 62%로 가장 높은 비율을 차지한다고 보고하였다.

8) Huang et al.(2014), pp.13834-13843.

9) 문광주 외(2011), pp.711-722.

10) 진형아 외(2012), pp.211-221.

〈표 2-4〉 미세먼지(PM_{2.5}) 발생에 대한 국내요인 관련 연구내용

출처	분석시점	분석지역	주요 오염원
문광주 외(2011)	2010년	서울	자동차 및 생체연료 연소(40%), 2차 에어로솔(38%)
진형아 외(2012)	2008년	전국	연료 연소(62%), 이동오염원(33%), 산업공정(3.2%)
김도균 외(2012)	2011년	수원	토양 및 도로(15.5%), 디젤차(12.6%), 가솔린차(2.8%)
김기주 외(2014)	2010~2011년	제주도	인위적 오염원 > 해양 및 토양
정영진, 황인조(2015)	2010~2012년	경산	2차 질산염(20.6%), 생체소각(15.5%), 산업(10.4%)
국립환경과학원(2013)	2010~2012년	수도권	생체 연소(16.0%), 자동차(14.8%), 연료 연소(5.3%)
박순애, 신현재(2017)	2015~2016년	전국	중국 산둥성(山東) 미세먼지(PM _{2.5}) 농도 및 국내 시멘트산업 제조업 유의미한 영향

자료: 박순애, 신현재(2017), pp.227-248을 토대로 저자 수정.

오염원의 분포는 계절이나 기상현상에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 미세먼지(PM_{2.5})와 기상요인 간 연관성 분석결과 강수량이 많은 여름철에 미세먼지(PM_{2.5})의 농도가 낮아지고, 황사가 자주 발생하는 봄철에는 미세먼지(PM_{2.5})의 농도가 높아지는 것이 보고되었다. 11)12)13) 서울, 인천, 경기도, 광주, 경북 경산 등에서 황사기간의 미세먼지(PM_{2.5}) 조성을 평가한 결과에 따르면 황사기간 중 토양 발생원을 대표하는 Mg²⁺, Al, Si, Ca²⁺, Ti, Fe, K⁺ 물질의 미세먼지(PM_{2.5}) 기여도가 비황사기간에 비해 높았다.¹²⁾¹³⁾ 봄철 황사기간에 증가하는 구성성분의 오염원은 주로 몽골 동부지역과 고비사막에서 장거리를 이동하여 오는 물질인 것으로 추정되었다.¹³⁾ 2차생성 오염물질 중 황산염은 여름철 대기 중 광화학반응의

11) Kim et al.(2007), pp.6762-6770.

12) Lee et al.(2008), pp.199-211.

13) Heo et al.(2009), pp.4957-4971.

증가로 농도가 증가하고, 질산염은 겨울철 낮은 온도와 높은 습도로 인해 가스 상태의 질산이 입자 상태인 질산암모늄으로 변화하기 유용한 조건이 갖춰져 농도가 증가하는 것으로 나타났다.¹¹⁾¹²⁾ 스모그(smog) 기간 중의 미세먼지(PM_{2.5}) 조성에 관한 평가는 서울과 인천 지역에서 시행되었으며, 공통적으로 스모그 기간에는 황산염, 질산염, 암모늄과 같은 2차생성 오염물질의 비율이 비스모그 기간에 비해 높은 것으로 나타났다.¹¹⁾¹²⁾ 특히 스모그 기간에 증가하는 미세먼지(PM_{2.5})의 구성물질은 2차생성 오염물질로, 이는 장거리이동을 통해 유입되기 쉬운 물질이다. 따라서 2차생성 오염물질 농도의 증가는 지역 내 오염원보다는 장거리 이동을 통해 유입된 오염물질로 때문인 것으로 추정된다.¹¹⁾

2. 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 건강영향 연구 사례

가. 미국

1999년 미국 환경청(U.S Environmental Protection Agency)은 뉴욕대학교 의과대학에 “EPA NYU PM Center: Health Risks of PM Components” 센터를 지정하고 미세먼지의 물리적·화학적 특성의 파악과 미세먼지 구성성분에 따른 건강영향을 연구하였다.¹⁴⁾

미세먼지센터는 1999년부터 2005년까지 운영되었고 다양한 연구가 진행되었으며, 구체적인 프로젝트는 다음과 같다.¹⁴⁾

- PROJECT 1. 인간 기도 모양(airway geometry)의 변화 평가: 입자 침전 및 반응량 평가
- PROJECT 2. 미세먼지 노출 특성
- PROJECT 3. 미세먼지 독성의 결정인자로서 연소 생성 대기의 물리화학적 매개변수
- PROJECT 4. 미세먼지 관련 유기화학물의 심혈관계에 미치는 영향
- PROJECT 5. 감염성 폐렴을 악화시키는 미세먼지 관련 전이금속의 입자 크기와 용해성의 역할
- PROJECT 6. 미세먼지에 의한 천식 민감성에 대한 전향적 연구 : 주요 미세먼지 구성 성분 및 생체지표 영향에 대한 역학조사
- PROJECT 7. 고농도 미세먼지와 가스상 오염물질의 상호노출 영향

미세먼지센터에서 수행한 연구 프로젝트는 미세먼지와 관련한 건강영향에 관한 과학적 근거를 제공하는 데 기여하였으며, 정책결정과 관련하여 불확실성을 줄이기 위한 정보를 제공하였다.¹⁴⁾ 특히 미국의 국가대기환경기준(NAAQS: National Ambient Air Quality Standards)에서 미세먼지와 관련하여 건강에 영향을 미치는 미세먼지 구성성분의 효과에 관한 연구에 행하는 것에 중점을 두었다.¹⁴⁾

14) U.S. Environmental Protection Agency, “NYU-EPA PM Center”, 검색일: 2019.9.6.

미세먼지센터에서 진행한 프로젝트를 통하여 도출된 미세먼지에 의한 건강영향의 구체적인 연구결과는 <표 2-5>와 같다. 미세먼지센터에서 진행한 연구들은 미세먼지 배출원에 따른 전체 사망, 심혈관계 관련 질환 사망 등에 대한 분석을 중심으로 이루어졌다.

<표 2-5> 미세먼지센터의 미세먼지에 의한 건강영향 연구

출처	연구대상 지역 및 기간	연구결과
Ma et al. (2006)	애리조나주 피닉스 (1995-1997)	- PM _{2.5} 배출원별 전체 사망과 심혈관계 관련 사망의 연관성을 포아송 일반선형모델(GLM)을 사용하여 분석 - 교통과 구리제련 관련 2차 황산염과 심혈관계 관련 사망과 밀접한 관련을 보임(IQR 16.0%). - 토양 및 바이오매스 연소 증가로 인한 사망위험과 관련이 없었음.
Ito et al. (2006)	미국 워싱턴 DC (1988-1997)	- 미세먼지 배출원에 따른 전체 사망, 심혈관계 사망에 대하여 포아송 일반선형모델(GLM)을 통해 상대위험 추정 - 황산염에 의한 전체 사망 사망률이 6.7%(95% CI : 1.70-11.7)로 나타남. 석탄 관련 미세먼지의 경우도 황산염과 마찬가지로 5.0%(95% CI: 1.0, 9.1)로 유의미한 결과를 보임.

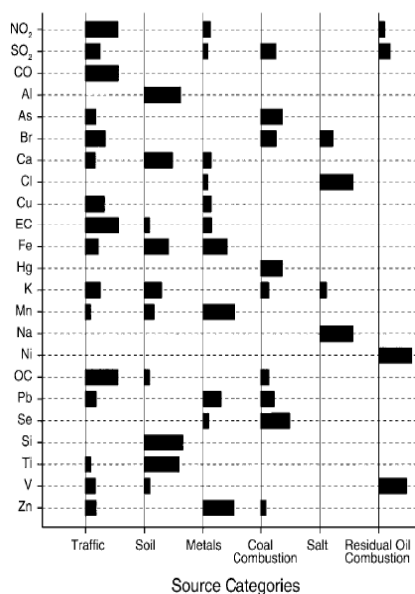
자료: Mar et al.(2006), pp.311-320; Ito et al.(2006), pp.300-310.

미국의 건강영향연구소(HEI: Health Effects Institute)는 2013년 “National Particle Component Toxicity (NPACT) Initiative: Integrated Epidemiologic and Toxicologic Studies of the Health Effects of Particulate Matter Components” 보고서를 발간하였다. 이 보고서는 미세먼지 구성성분에 의한 건강영향에 대한 통합적 역학 및 독성 연구 등 4개의 연구로 구성되어 있으며, 미세먼지 구성성분에 의한 건강영향 연구로 미세먼지 구성성분과 사망 및 입원 영향에 대하여 시계열 분석 연구를 수행하였다.¹⁵⁾

미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 의한 사망영향 연구로, Ito et al.(2013)¹⁵⁾는 미국 150개 도시를 대상으로 2001년부터 2006년까지 자료의 가용성을 기반으로 대기오염, 기상, 사망률 자료를 구축하였다. 미세먼지(PM_{2.5})의 주요 구성성분에 대한 모니터링 사이트가 있는 도시를 대상으로 자료를 구축하였으며, 포아송 회귀모형을 활용하여 각 도시에 대하여 당일부터 3일 전까지 미세먼지(PM_{2.5}) 농도와 전체 사망, 심혈관계 입원, 호흡기계 입원에 대한 단기위험을 예측하였다.¹⁵⁾

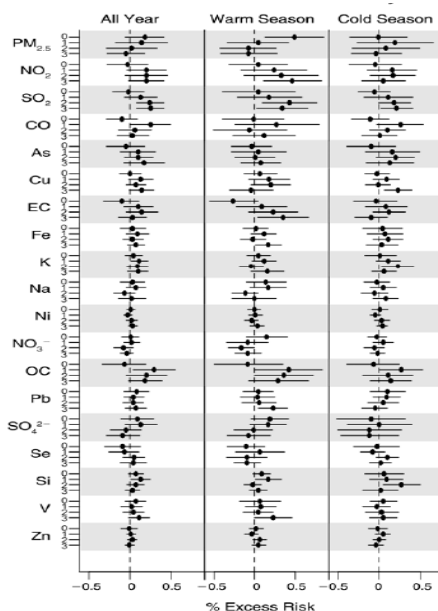
15) Ito et al.(2013), pp.95-125.

Ito et al.(2013)의 연구에서는 64개 도시에서 요인분석을 통하여 6개 주요 배출원(교통, 토양, 석탄연소, 염분, 금속, 잔유 연소)별로 미세먼지(PM_{2.5})와 가스상 오염물질을 확인하였다(그림 2-2, 그림 2-3 참조).¹⁵⁾ 시계열 분석 결과 미세먼지(PM_{2.5})와 가스상 오염물질의 성분은 미세먼지(PM_{2.5}) 질량농도와 같이 건강영향과 밀접한 연관성을 보였다.¹⁵⁾ 또한 계절별 건강위험을 분석한 결과, 추운 계절(SO₂, Cu, K⁺, OC, Si)보다 따뜻한 계절(NO₂, SO₂, EC, OC, Pb, Si 및 V)에 사망위험이 높았고, 이와 반대로 심혈관계 관련 질환 입원의 경우는 대부분 추운 계절에서 입원 위험이 높았으며, 관련된 오염물질은 PM_{2.5}, NO₂, SO₂, CO, Cu, EC, Fe, OC, SO₄, Se, Si, Zn이었다.¹⁵⁾



자료: Ito et al.(2013), pp.95-125.

〈그림 2-2〉 배출원별 미세먼지(PM_{2.5}) 성분 및 가스상 오염물질의 factor loading



자료: Ito et al.(2013), pp.95-125.

〈그림 2-3〉 미세먼지(PM_{2.5}) 성분별 계절별 전체사망 초과위험

미국의 국가대기환경기준(NAAQS: National Ambient Air Quality Standards)에 대한 검토는 5년마다 이루어진다. 검토과정은 통합검토계획(IRP: Integrated Review Plan), 통합과학평가(ISA: Integrated Science Assessment), 위험·노출 평가(REA: Risk and

Exposure Assessment), 정책평가(PA: Policy Assessment), 법제정(Rulemaking)의 5단계로 진행된다.¹⁶⁾ 최근 2018년 미세먼지(PM_{2.5})에 대한 통합과학평가(ISA: Integrated Science Assessment)가 이루어졌으며, 통합과학평가에서는 미세먼지(PM_{2.5}) 관련 오염원, 화학적 성분, 분포 등 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 전반적 특성을 파악하고, 미세먼지(PM_{2.5}) 노출에 의한 건강영향 연구 검토가 이루어진다. 특히 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 따른 건강영향에 대한 연구의 검토가 처음으로 이루어졌다.¹⁷⁾

미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분과 사망률 사이의 관계에 대한 검토는 일반적으로 두 가지 유형으로 나눌 수 있다.¹⁷⁾ 첫 번째는 미세먼지(PM_{2.5})의 특정 구성성분이 사망률 연관성에 수정 효과가 있는지 여부이고, 두 번째는 미세먼지(PM_{2.5}) 질량과 비교하여 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 농도와 비율에 의한 사망률과 관련성을 확인하는 것이다.¹⁷⁾ 미세먼지(PM_{2.5})의 통합과학평가에서는 두 번째 접근에 초점을 맞추어 검토가 이루어졌다.¹⁷⁾

최근까지 수행된 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분과 관련한 대부분의 연구는 단일 구성성분 모델을 활용하였다. 하지만 이러한 단일 구성성분 모델은 미세먼지(PM_{2.5}) 질량과 구성성분의 잠재적 교란효과를 설명하는 데 한계점을 가지고 있다. 계절 분석에서는 대부분의 구성성분이 따뜻한 계절에 건강영향과 상관성이 높게 나타났다. 미국을 연구대상으로 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 단기노출에 의한 건강영향 연구 사례는 <표 2-6>과 같다.

<표 2-6> 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 단기노출에 의한 건강영향 연구

출처	대상지역	건강영향	구성성분	결과
Ostro et al. (2007)	미국 캘리포니아주 6개 도시 (2000-2003)	심혈관계 사망	Al, Br, Ca ²⁺ , Cl ⁻ , Cu, EC, Fe, K ⁺ , Mn, Ni, NO ₃ ⁻ , OC, Pb, S, Si, SO ₄ , Ti, V, Zn	- PM _{2.5} , EC, OC 및 NO ₃ ⁻ 의 경우 사분위 범위가 14.6, 0.8, 4.6, 5.5 pg/m 인 경우 심혈관계 사망이 1.6%, 2.1%, 1.6%, 1.5 % 증가
Ostro et al. (2008)	미국 캘리포니아주 6개 도시 (2000-2003)	심혈관계 사망	Ca ²⁺ , Cl ⁻ , Cu, EC, Fe, K ⁺ , NO ₃ ⁻ , OC, S, Si, SO ₄ , Ti, Zn	- 인종/민족(백인, 히스패닉, 흑인) 및 교육(고등학교 졸업 여부)에 따라 계층화 후 분석 - 교육수준이 낮은 집단에서 심혈관계 사망률이 3~5% 증가

16) U.S. Environmental Protection Agency, "Process of Reviewing the National Ambient Air Quality Standards", 검색일: 2019.9.6.

17) U.S. EPA(2018), pp.11-43.

〈표 2-7〉의 계속

출처	대상지역	건강영향	구성성분	결과
Kim et al. (2015)	Denver, CO (2003-2007)	전체 사망 심혈관계 사망 호흡기계 사망	EC, NO ₃ ⁻ , OC, SO ₄ ²⁻	- 전체 사망의 상대위험도는 NO ₃ ⁻ 와 SO ₄ 보다 EC(RR=1.024(95% CI: 1.005-1.043))와 OC(RR=1.020(95% CI: 1.000-1.040))에서 높게 나타남. - PM _{2.5} 성분에서 연소관련 물질이 2차생성물질보다 일일 사망률과 밀접한 관련성을 보임.
Liu and Zhang (2015)	Houston, TX (2000-2011)	전체 사망	Al, Br, Cr, Cu, EC, Fe, K ⁺ , Mn, Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , Ni, NO ₃ ⁻ , OC, Si, SO ₄ ²⁻ , V, Zn	- 포아송 회귀모델을 적용하여 PM _{2.5} 구성 성분과 사망률 간의 연관성 평가 - NH ₄ ⁺ (0.881 μ g/m ³), NO ₃ ⁻ (0.487 μ g/m ³), SO ₄ ²⁻ (2.245 μ g/m ³)의 사분위수 범위 증가 사망위험도가 각 0.69%(95% CI: 0.26, 1.12%), 0.38%(95% CI: 0.11, 0.66%), 0.61%(95% CI: 0.15, 1.06%)
Zhou et al. (2011)	Detroit, MI Seattle, WA (2002-2004)	전체 사망 심혈관계 사망 호흡기계 사망	Al, EC, Fe, K ⁺ , Na ⁺ , Ni, S, Si, V, Zn	- 심혈관계 사망 및 호흡기계 사망은 지역별 계절별로 다양한 패턴을 보임. - 디트로이트에서의 사망과 관련된 PM _{2.5} 성분 중 2차생성물질과 교통 관련 물질이 사망과 연관성을 보임. - 시애틀에서는 사망률과 가장 밀접한 관계가 있는 성분은 교통 관련 성분과 연료 연소와 관련한 성분이었음.
Ito et al. (2011)	New York, NY (2000-2006)	심혈관계 사망	Br, EC, Na ⁺ , Ni, NO ₃ ⁻ , OC, SO ₄ , Se, Si, V, Zn	- 따뜻한 계절(4월~9월) 및 추운 계절(10월~3월)에 대해 사분위수 범위 증가당 초과 사망 분석 - 석탄 연소 관련 구성요소(예: Se)는 여름에 CVD 사망률과 관련이 있음. - EC와 NO ₂ 는 두 계절 모두 사망 증가와 연관성을 보임.

자료: U.S. EPA(2018), pp.11-43.

나. 유럽

“MED-PARTICLES” 프로젝트는 2010년부터 2013년까지 유럽위원회의 지원을 받아 지중해 연안국가(스페인의 3개 도시, 프랑스의 1개 도시, 이탈리아의 8개 도시, 그리스의 2개 도시) 14개 도시의 미세먼지 구성성분의 특성을 파악하고 미세먼지 노출에 의한 건강영향 연구를 진행한 프로젝트이다(그림 2-4 참조).¹⁸⁾ 특히 이 프로젝트는 지중해 국가의 여러

지역에서 사하라사막의 먼지와 산불에 따른 입자 크기와 조성의 지리적 차이를 파악하고 미세먼지의 구성성분에 따른 급성 건강영향을 파악하고자 하였다.¹⁹⁾



자료: Researchgate, “Urban Cities Involved in the MED-PARTICLES”, 검색일: 2019.9.6.

〈그림 2-4〉 “MED-PARTICLES” 프로젝트 참여 지중해 지역 도시

“MED-PARTICLES”는 크게 7개 목표를 가지고 프로젝트를 진행하였다.²⁰⁾

- 목표 1. 입자 크기(미세먼지(PM₁₀), 미세먼지(PM_{2.5}, PM_{2.5-10}) 및 구성성분(원소탄소, EC, 유기탄소, OC, 질산염, 황산염 및 금속)의 지리적 차이 평가
- 목표 2. 지중해 연안국가 도시의 사하라 사막의 먼지 발생일수와 산불 발생일수 평가
- 목표 3. 지중해 연안국가 도시에서 사하라 사막의 먼지 있는 날/먼지 없는 날과 산불 있는 날/산불 없는 날의 입자 크기와 조성 비교
- 목표 4. 심혈관계 질환 및 호흡기계 질환에 대한 일별 사망률 및 응급 입원에 대한 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 급성 건강영향 평가

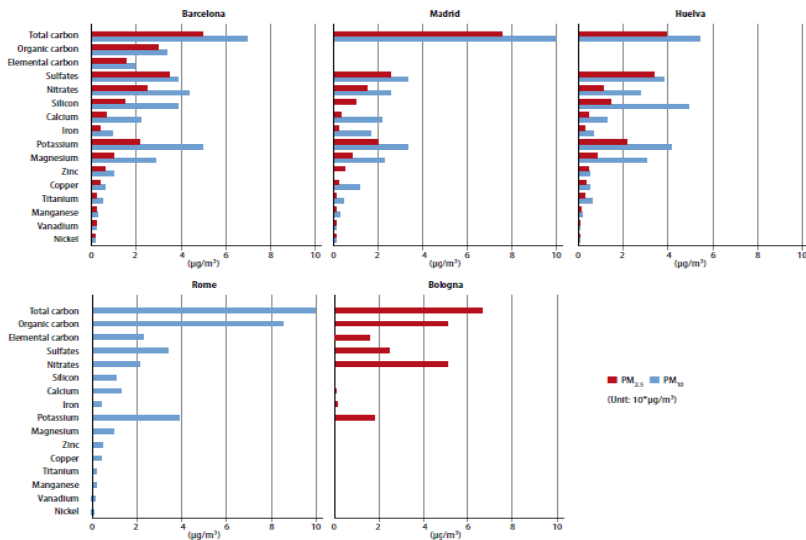
18) MED-PARTICLES, “Particles Size and Composition in Mediterranean Countries: Geographical Variability and Short-Term Health Effects”, 검색일: 2019.9.6.

19) MED-PARTICLES, “MED-PARTICLES - Particles Size and Composition in Mediterranean Countries: Geographical Variability and Short-Term Health Effects.”, 검색일: 2019.9.6.

20) MED-PARTICLES, “The Project”, 검색일: 2019.9.6.

- 목표 5. 사하라사막의 먼지 및 산불의 잠재적 영향을 평가하여 입자와 일별 사망률 및 심혈관계 질환 및 호흡기계 질환에 대한 응급 입원 간의 관련성 확인
- 목표 6. 미세먼지 성분에 따른 급성 건강 영향에 대한 영향 분석
- 목표 7. 역학 및 통계 분석에서 관련 분야 관계자를 교육하고 다양한 이해관계자(정책 입안자, 환경 및 보건 당국, 학계 및 산업)가 이용할 수 있는 과학정보 보급

“MED-PARTICLES” 프로젝트에서는 스페인의 3개 도시(바르셀로나, 마드리드, 우엘바)와 이탈리아 2개 도시(로마, 볼로냐)를 대상으로 미세먼지 구성성분에 대한 농도를 수집하고, 사망 영향을 분석하였다.¹⁸⁾ 프로젝트 대상지역별 미세먼지 구성성분 농도는 <그림 2-5>와 같으며, 미세먼지 배출원별 주요 구성성분으로 교통 관련 구성성분에는 원소탄소(EC)가 포함되고, 도로 먼지에는 철(Fe), 망간(Mn), 티타늄(Ti)이, 2차 오염물질 관련 구성성분으로는 황산염(SO₄²⁻)이, 연료 및 석유 연소 관련 주요 미세먼지 구성성분으로는 니켈(Ni)이 포함되었다.²¹⁾

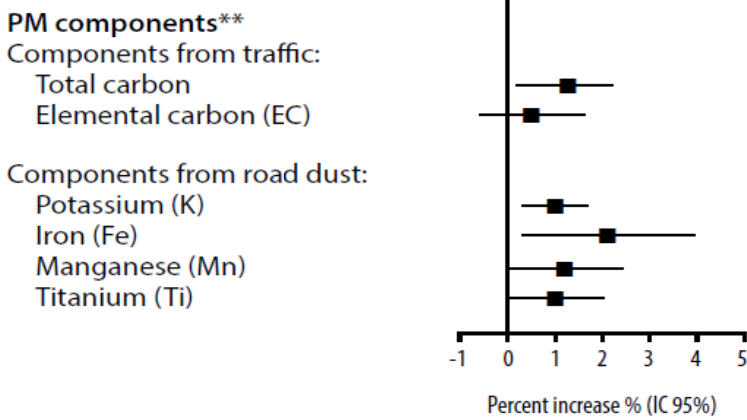


자료: The MED-PARTICLES Project(2013), p.8.

<그림 2-5> “MED-PARTICLES” 프로젝트 대상지역별 미세먼지 구성성분 농도

21) The MED-PARTICLES Project(2013), p.8.

“MED-PARTICLES” 프로젝트에서 미세먼지 구성성분의 사망증가율은 <그림 2-6>과 같으며, 미세먼지 구성성분과 건강영향 평가에 있어 교통과 도로비산먼지에 의한 사망영향이 연관성이 있는 것으로 나타났다.²²⁾ 특히 교통 관련 미세먼지 성분에 있어 전체 탄소의 사분 위수 증가 시 사망위험이 증가하는 것으로 나타났으며, 도로비산먼지에 의한 철, 망간의 사분 위수 증가 시 사망위험이 증가하는 것으로 나타났다.²²⁾



* Effects per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increase
 ** Effects per IQR (inter-quartile range) increase

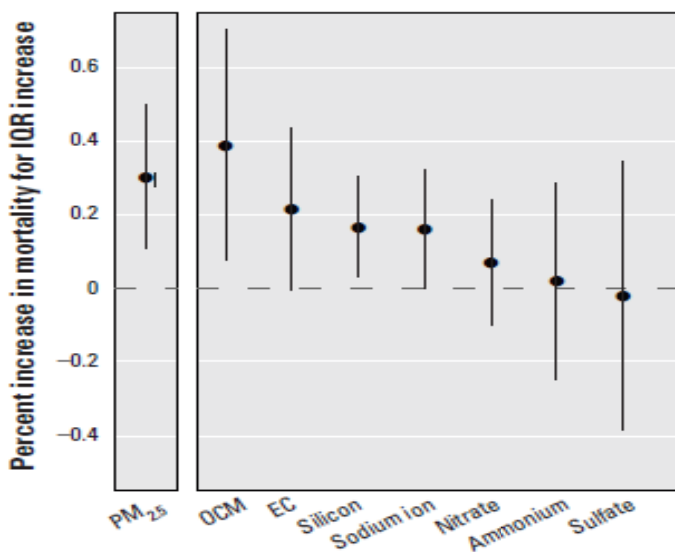
자료: The MED-PARTICLES Project(2013), p.10.

<그림 2-6> 미세먼지 구성성분의 사망증가율

22) The MED-PARTICLES Project(2013), p.10.

3. 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 건강영향 연구

Krall et al.(2013)²³⁾는 2000~2005년까지 미국 72개 도시를 대상으로 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분과 사망영향을 분석하였다. 미세먼지(PM_{2.5}) 성분 중에서 전체 질량의 대부분(79~85%)을 차지하는 OCM, EC, Si, Na⁺, 질산염, 암모늄, 황산염 등 총 7가지 성분을 분석하였으며, 계절(봄, 여름, 가을, 겨울)과 지역(동북, 남동, 남중서부, 북중서부, 남서부, 북서부) 별로 상관성을 분석하였다.²³⁾ 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망증가율은 <그림 2-7>과 같다. 구성성분의 사분위수 증가 시 사망위험의 증가는 OCM 0.39%(95% PI: 0.08, 0.70), EC 0.22%, Si 0.17%, Na⁺ 0.16%로 나타났다.²³⁾ 하지만 이러한 구성요소 중 어떠한 것이 미세먼지(PM_{2.5}) 질량보다 사망률에 더 큰 영향을 주는지에 대한 평가는 이루어지지 못하였다.



자료: Krall et al.(2013), pp.1148-1153.

<그림 2-7> 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망증가율

23) Krall et al.(2013), pp.1148-1153.

초기 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 의한 건강영향 연구는 미국을 중심으로 단위 오염성분에 대한 연구가 주로 이루어졌으나 최근에는 유럽, 중국, 미국 등에서 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 의한 건강영향 연구를 지속적으로 진행하고 있다.

Ito et al.(2013)¹⁵⁾, Krall et al.(2013)²³⁾의 연구결과에서 살펴보았듯이 미국의 경우, 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분과 일별 사망률의 상관성을 분석한 결과 사망과의 연관성을 보이는 구성성분이 지역이나 계절에 따라 다른 것으로 나타났다. 지역이나 계절에 따른 이질성의 원인으로는 지역별 오염원의 특성, 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 기여율 차이, 지역별 인구학적 특성의 차이 등이 영향을 미친 것으로 조사되었다.

최근에는 미국 또는 유럽 지역 외에 중국, 일본, 한국 등 일부 아시아 지역에서도 미세먼지(PM_{2.5}) 조성과 건강영향에 대한 연구들이 진행되고 있다. Lin, H. et al. (2016)²⁴⁾의 연구에서 광저우의 경우 2차생성 오염물질(SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺)과 연소과정에서 발생하는 오염물질인 OC, EC가 심혈관계 질환으로 인한 사망과 연관성이 있는 것으로 보고되었다. Ueda, K. et al. (2016)²⁵⁾은 일본 나고야에서 시행된 연구에서 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 중 생물연소와 화석연료의 연소과정에서 생성되는 오염물질과 2차생성 오염물질이 사망과 연관성이 있는 것으로 나타났으며, 사망원인별로 유의한 연관성을 보이는 물질들이 다른 것으로 나타났다. Heo, J. et al. (2014)²⁶⁾의 국내에서 서울지역을 대상으로 시행된 연구에서 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분과 사망과의 연관성을 분석한 결과 생물성연소와 차량연료의 연소과정, 2차생성 오염물질이 사망과 연관성이 있는 것으로 나타났다.

현재까지 진행된 미세먼지(PM_{2.5}) 조성과 건강영향에 대한 연구를 종합적으로 살펴보았을 때, 개별 구성성분의 위험도는 지역별, 사망원인별, 상병원인별, 계절 등에 따라 달라지는 것으로 판단된다. 생물성연소, 지역내 난방을 위한 화석연료와 차량 연료의 연소과정에서 생성되는 오염물질들, 2차생성 오염물질이 건강과 연관성이 큰 것으로 비교적 일관되게 보고하고 있다. 특히 일부 오염물질의 경우 미세먼지(PM_{2.5})의 질량농도를 이용하여 추정된 사망의 위험도 보다는 구성성분을 이용하여 추정된 사망의 위험도가 더 크게 나타나 미세먼지

24) Lin et al.(2016), pp.758-766.

25) Ueda et al.(2016), pp.249-257.

26) Heo et al.(2014), pp.379-388.

(PM_{2.5})의 질량농도 보다는 일부 미세먼지(PM_{2.5})를 구성하는 구성성분이 건강의 악영향에 더 주요하게 기여하는 것으로 나타났다. 이는 미세먼지(PM_{2.5})의 질량농도만을 규제하는 것으로 국민의 건강을 충분히 보호하지 못함을 의미한다. 최근 이루어진 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 건강영향 연구 사례를 정리한 결과는 <표 2-8>과 같다.

<표 2-8> 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 건강영향 연구

출처	연구대상 지역 및 기간	연구결과
Chen et al. (2018)	중국 2013-2015	- PM _{2.5} 구성성분의 계절적 추세 분석 - PM _{2.5} 구성성분별로 호흡기계 사망위험을 IQR 증가에 따라 Potassium은 0.51%(95% CI : 0.17~0.85%), OC는 2.65%(95% CI : 0.18~5.18%) 높임.
Atkinson et al. (2015)	전 세계 주요 도시 2013	- PM _{2.5} 구성성분과 건강영향을 평가한 논문 68개를 분석한 결과 SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , EC, OC는 총사망, 호흡기계 사망위험을 높임.
Basagaña et al.(2015)	유럽 5개 도시 바르셀로나(2003-2010), 마드리드(2007-2008), 우엘바(2003-2010), 로마(2005-2007), 블로냐(2011-2013)	- PM _{2.5} 구성성분과 총사망, 심혈관계 사망, 호흡기계 사망 위험 분석 - Fe과 Ti은 총사망의 사망위험을 높였으며, EC와 Mg ²⁺ 는 심혈관계 관련 질환 사망위험을 높임.
Lin et al. (2016)	중국, 광저우 2007~2011	- PM _{2.5} 화학성분, 주로 연소 관련(OC, EC) 및 2차 입자(SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺)는 심혈관계 관련 질환 사망률과 높은 연관성을 보임.
Ueda et al. (2016)	일본, 나고야 2003.04~2007.12	- 연소 및 교통과 관련된 SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl, NH ₄ ⁺ , EC, OC는 심혈관계 관련 사망과 호흡기계 관련 사망위험을 높임.
Heo et al. (2014)	대한민국, 서울 2003.03~2007.11	- PM _{2.5} 구성성분과 심혈관계 사망, 호흡기계 사망위험 분석 - OC, EC, Pb은 사망률과 관련이 있음. - 이동 배출량(예 : 휘발유 및 디젤 배출량)과 생물성 연소의 PM _{2.5} 질량은 호흡기계 사망률 및 심혈관계 사망률과 높은 연관성을 보임.

자료: Heo et al.(2014), pp.379-388; Atkinson et al.(2015), pp.208-214; Basagaña et al.(2015), pp.151-158; Ueda et al.(2016), pp.249-257; Lin et al.(2016), pp.758-766; Chen et al.(2018), pp.11378-11386.

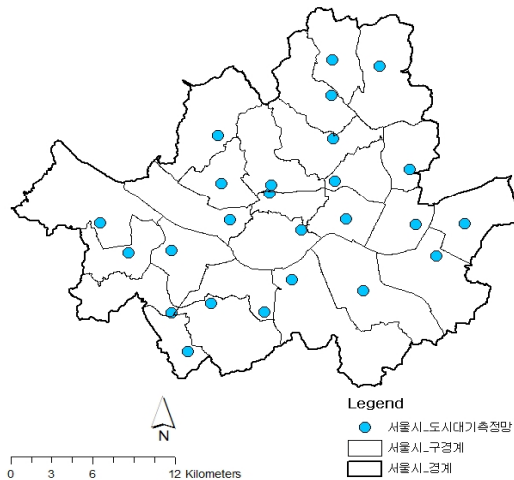
제3장

미세먼지 구성성분의 특성 분석

1. 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 특성

본 연구에서 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분에 대한 분석은 자료의 가용성을 고려하여 서울시를 중심으로 살펴보았으며, 구성성분 특성에 앞서 2015년부터 2017년까지 서울시 미세먼지(PM_{2.5})의 연평균 농도 변화를 파악하였다.

미세먼지(PM_{2.5}) 농도 자료는 서울시 보건환경연구원에서 운영하는 도시대기측정소에서 관측한 자료를 이용하였다. 서울시 보건환경연구원은 2017년 기준 25개 구별 1개씩 총 25개의 도시대기측정망을 운영하고 있다(그림 3-1 참조).



자료: 저자 작성.

〈그림 3-1〉 서울시 도시대기측정망 지점

미세먼지(PM_{2.5})의 공간분포를 파악하고 서울시 구별 자료를 추출하기 위하여 공간분석 보간법에서 활용되는 크리깅(kriging) 방법을 적용하였다. 서울시 구별 미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 Zonal Statistics을 활용하여 해당 구에 속한 셀 값의 평균으로 농도 자료를 추출하였으며 크리깅 분석은 ArcGIS 10.1을 활용하였다.

2015~2017년까지 서울시 25개 구별 미세먼지(PM_{2.5}) 농도를 추출하였으며 기본통계량은 <표 3-1>과 같다. 3년간 서울시 미세먼지(PM_{2.5})의 연평균 농도값은 2016년에 26.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았으며, 구별 미세먼지(PM_{2.5})의 농도 차이는 2015년이 다른 연도보다 다소 크게 나타났다. 3년간 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도에 뚜렷한 변화는 나타나지는 않았다.

<표 3-1> 2015~2017년 서울시 구별 미세먼지(PM_{2.5}) 기본통계량

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

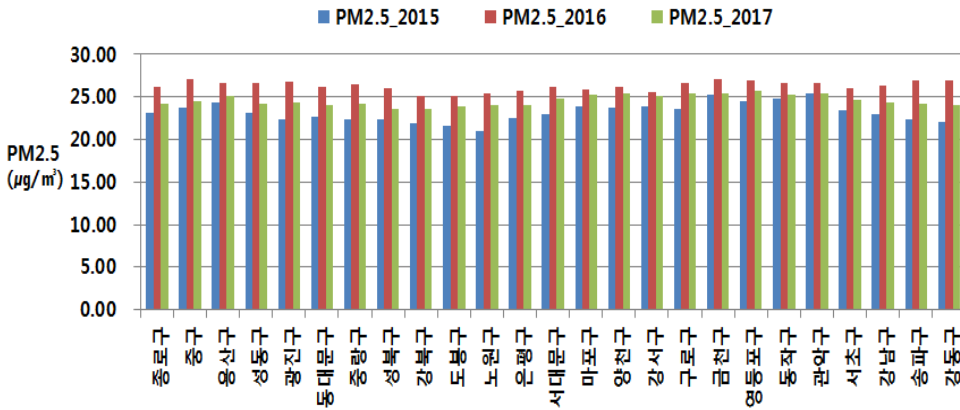
연도	평균	표준편차	최소	최대
2015	23.21	1.14	20.96	25.42
2016	26.29	0.58	25.08	27.09
2017	24.59	0.64	23.63	25.68
평균	24.70	0.69	23.48	25.94

자료: 저자 작성.

2015년부터 2017년까지 서울시 구별 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 추세는 <그림 3-2>와 같다.

앞서 기본통계량에 살펴보았듯이 연도별로 전체 자치구가 2015년에 미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 가장 낮았으며, 2016년에 미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 가장 높았다. 2015년부터 2017년까지 25개 구는 현재 강화된 미세먼지(PM_{2.5}) 연평균 대기환경기준인 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 모두 초과하는 것으로 나타났다.

2015년부터 2017년까지 미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 상위 10%인 지역에 한 번이라도 포함된 자치구는 중구, 구로구, 금천구, 영등포구, 관악구였으며 하위 10%에 속한 구는 성북구, 강북구, 도봉구, 노원구로 나타났다. 금천구는 2015년과 2016년에 모두 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 상위 10%에 포함되었다.

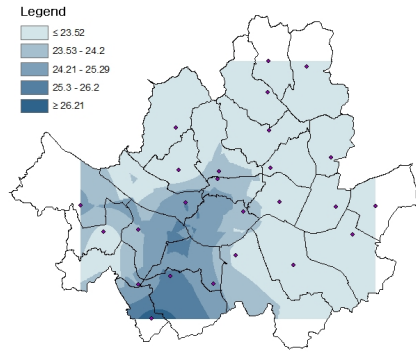


자료: 저자 작성.

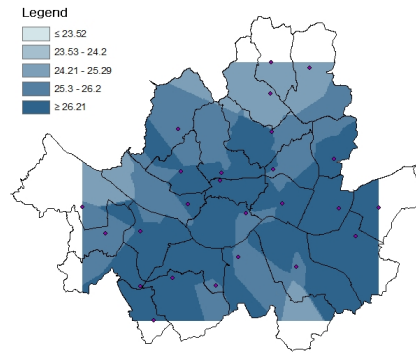
<그림 3-2> 2015~2017년 서울시 구별 미세먼지(PM_{2.5}) 농도

2015년부터 2017년까지 연도별 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도의 공간적 분포를 분석하였다(그림 3-3). 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 공간분포의 연도별, 지역별 비교를 위하여 등간격으로 5개 구간(20% 이하, 20~40% 미만, 40~60% 미만, 60~80% 미만, 80% 이상)으로 구분하였다.

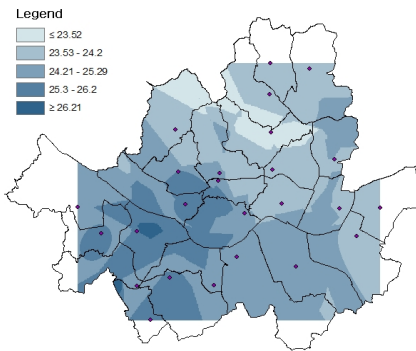
2015년과 2017년의 경우 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 범위가 80% 이상(26.21µg/m³ 이상) 지역이 없는 반면 2016년은 서울의 북부를 제외한 서울 전역에서 미세먼지(PM_{2.5}) 연평균 농도가 26.21µg/m³ 이상으로 나타났다. 공간적 분포를 살펴보면 서울시 북동지역의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 분포는 다른 지역보다 낮은 반면에 남서지역의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 다른 지역보다 높은 패턴을 보였다.



2015



2016



2017

자료: 저자 작성.

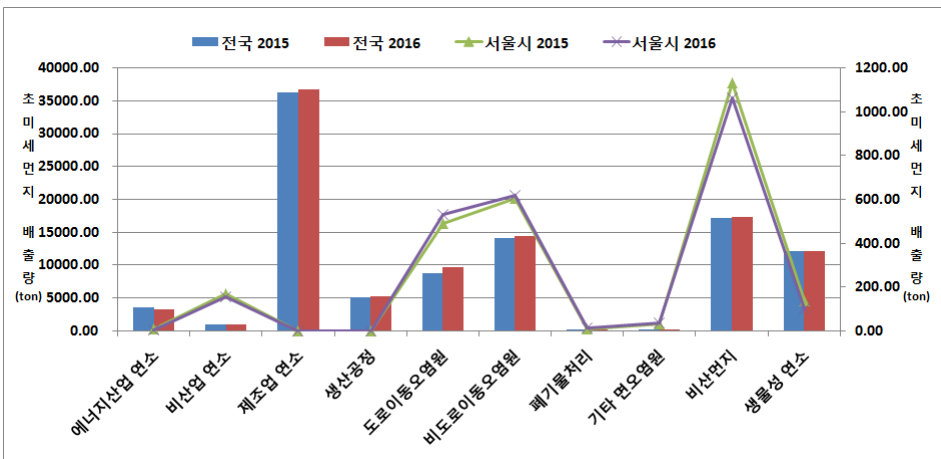
〈그림 3-3〉 2015~2017년 서울시 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 분포

2. 미세먼지(PM_{2.5}) 배출 특성

미세먼지(PM_{2.5})의 특성 파악에 있어 국립환경과학원에서 운영 중인 국가대기오염물질배출량서비스 시스템의 최근 대기오염물질배출량 자료를 활용하여 2015년과 2016년의 배출원별 전국과 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 배출 특성을 파악하였다. 전국과 서울시의 배출원별 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 <그림 3-4>와 같다.

전국의 미세먼지(PM_{2.5}) 총배출량은 2015년 98,806톤에서 2016년 100,247톤으로 증가한 반면, 서울시의 경우 2015년(2,580톤)보다 2016년(2,524톤)에 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량이 다소 감소한 것으로 나타났다. 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 전국의 약 2.5%를 차지한다.

전국의 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 제조업 연소, 비산먼지, 비도로이동오염원 순으로 높게 나타났으며, 서울시는 비산먼지, 비도로이동오염원, 도로이동오염원 순으로 높게 나타나 전국과 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 배출원에 차이가 있음을 알 수 있다(그림 3-4 참조).



자료: 저자 작성.

<그림 3-4> 2015~2016년 전국 및 서울시 배출원별 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량 비교

2015~2016년 전국과 서울시의 배출원별 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량을 구체적으로 살펴보면 <표 3-2>와 같다. 서울시에서 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량의 가장 큰 비중을 차지하는 도로 재비산, 건설활동 등에 의한 비산먼지의 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 2015년 43.92%에서 2016년 42.19%로 감소하였다. 이에 반면 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량에서 두 번째와 세 번째로 높은 비중을 차지한 항공, 선박, 건설기계 등에 의한 비도로이동오염원과 자동차에 의한 도로이동 오염원에서의 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 2015년보다 2016년에 더 증가한 것으로 나타났다.

<표 3-2> 2015~2016년 전국 및 서울시 배출원별 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량

(단위: 톤(%))

구분	2015년		2016년	
	전국	서울시	전국	서울시
에너지산업 연소	3,606.74 (3.65)	7.34 (0.28)	3,252.69 (3.24)	6.44 (0.26)
비산업 연소	1,025.48 (1.04)	167.29 (6.49)	978.37 (0.98)	157.08 (6.22)
제조업 연소	36,317.32 (36.76)	1.15 (0.04)	36,784.53 (36.69)	0.72 (0.03)
생산공정	5,131.81 (5.19)	0.00 (0.00)	5,191.42 (5.18)	0.00 (0.00)
도로이동오염원	8,816.65 (8.92)	488.58 (18.94)	9,748.37 (9.72)	529.83 (20.99)
비도로이동오염원	14,106.27 (14.28)	604.81 (23.45)	14,354.27 (14.32)	617.92 (24.48)
폐기물처리	209.47 (0.21)	7.00 (0.27)	251.97 (0.25)	11.59 (0.46)
기타 면오염원	284.96 (0.29)	32.67 (1.27)	274.99 (0.27)	35.47 (1.41)
비산먼지	17,247.84 (17.46)	1,133.05 (43.92)	17,286.42 (17.24)	1,064.64 (42.19)
생물성 연소	12,059.94 (12.21)	137.76 (5.34)	12,124.31 (12.09)	100.03 (3.96)
합계	98,806.48 (100.00)	2,579.66 (100.00)	100,247.34 (100.00)	2,523.72 (100.00)

자료: 저자 작성.

2015~2016년 서울시 구별 미세먼지(PM_{2.5}) 총배출량과 비율을 살펴보면 <표 3-3>과 같다. 구별로 비교하였을 때 2015년에는 강서구(10.73%), 송파구(9.21%), 강남구(8.15%) 순으로 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량 비중이 다른 구보다 높았으며, 2016년에는 송파구(11.23%), 강남구(8.23%), 중구(7.89%) 순으로 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량 비중이 높았다.

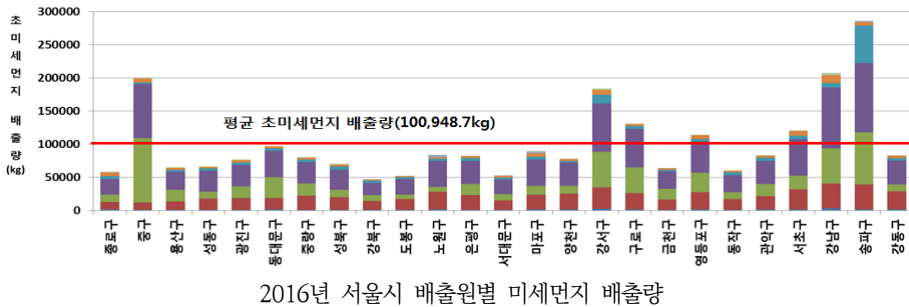
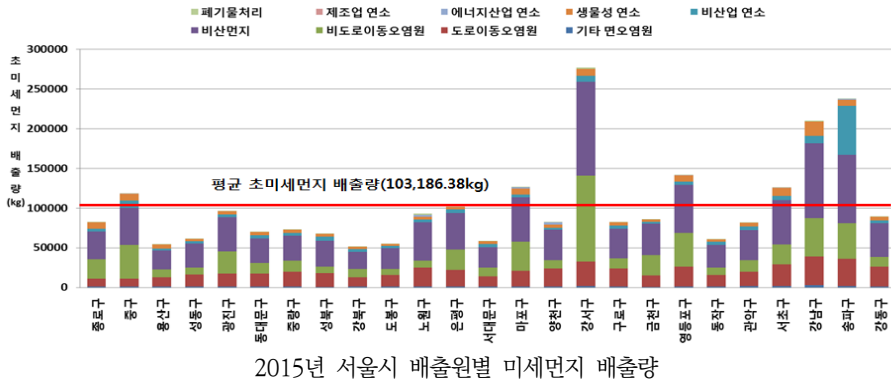
<표 3-3> 2015~2016년 서울시 구별 미세먼지(PM_{2.5}) 총배출량 및 비율

(단위: kg, %)

구분	2015년		2016년	
	배출량	비율	배출량	비율
종로구	82,040.40	3.18	57,375.38	2.27
중구	117,997.30	4.57	199,060.52	7.89
용산구	53,940.20	2.09	64,528.66	2.56
성동구	61,507.48	2.38	65,731.59	2.60
광진구	96,069.64	3.72	75,677.20	3.00
동대문구	69,897.92	2.71	96,792.92	3.84
중랑구	72,626.02	2.82	79,657.18	3.16
성북구	67,525.20	2.62	69,126.91	2.74
강북구	51,040.94	1.98	46,957.86	1.86
도봉구	54,753.52	2.12	51,623.57	2.05
노원구	93,109.74	3.61	84,330.29	3.34
은평구	101,544.84	3.94	81,743.54	3.24
서대문구	58,239.96	2.26	52,153.24	2.07
마포구	126,468.15	4.90	89,952.33	3.56
양천구	82,420.48	3.20	78,047.91	3.09
강서구	276,754.38	10.73	184,473.72	7.31
구로구	82,431.59	3.20	130,954.02	5.19
금천구	85,548.98	3.32	63,199.26	2.50
영등포구	141,391.33	5.48	113,654.39	4.50
동작구	60,727.62	2.35	59,800.00	2.37
관악구	81,250.52	3.15	82,518.60	3.27
서초구	125,553.19	4.87	120,001.66	4.75
강남구	210,131.36	8.15	207,586.84	8.23
송파구	237,516.46	9.21	285,947.46	11.33
강동구	89,172.42	3.46	82,822.23	3.28
합계	2,579,659.6	100.00	2,523,717.3	100.00

자료: 저자 작성.

2015~2016년 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량을 배출원별로 살펴보면 <그림 3-5>와 같다. 2015년 평균 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 103,186kg으로 평균 이상으로 미세먼지(PM_{2.5})를 배출하는 구는 중구, 마포구, 강서구, 영등포구, 서초구, 강남구, 송파구로 나타났다. 2016년의 평균 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량은 100,949kg으로 평균 이상 배출하는 지역은 중구, 강서구, 구로구, 영등포구, 서초구, 강남구, 송파구였다. 2015년과 비교하여 마포구와 강서구는 비산먼지와 비도로이동오염원에 의한 미세먼지(PM_{2.5}) 발생량이 줄면서 미세먼지(PM_{2.5}) 총배출량이 큰 폭으로 감소하였다. 반대로 중구와 송파구의 경우는 비산먼지와 비도로이동오염원에 의한 미세먼지(PM_{2.5}) 발생량이 늘면서 미세먼지(PM_{2.5}) 총배출량이 증가하였다.



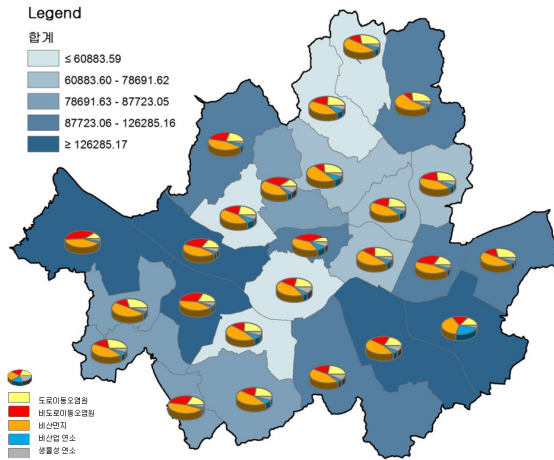
자료: 저자 작성.

<그림 3-5> 2015~2016년 서울시 배출원별 미세먼지 배출량

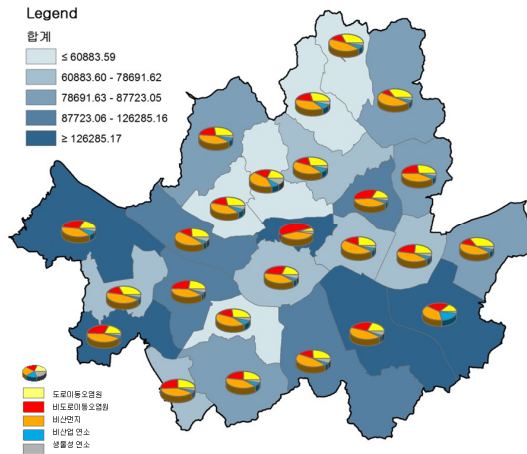
앞서 배출원별로 미세먼지($PM_{2.5}$) 배출량을 살펴본 결과 서울시 25개 구에서 비산먼지, 비도로이동오염원, 도로오염원, 비산업연소, 생물성 연소의 미세먼지($PM_{2.5}$) 배출량이 1~5 순위를 차지하고 있었다. 본 연구에서는 2015년과 2016년의 구별 미세먼지($PM_{2.5}$) 총배출량과 1~5순위 배출원 비중을 지도화하였으며 결과는 <그림 3-6>과 같다.

2015년 미세먼지($PM_{2.5}$) 총배출량이 상위 20%인 지역은 강서구, 영등포구, 마포구, 강남구, 송파구였다. 강서구는 김포공항이 위치해 있어 항공에 의한 비도로이동오염원의 미세먼지($PM_{2.5}$) 배출량이 다른 구와 비교하여 높게 나타났다. 송파구는 연료연소 중 비산업연소 비중이 다른 자치구보다 높았으며, 마포구는 다른 자치구와 비교하여 고기구이, 숯가마 등에 의한 생물성 연소의 미세먼지($PM_{2.5}$) 배출량 비중이 높았다. 도로오염원의 경우는 양천구, 강동구, 노원구에서 다른 구보다 비중이 높게 나타났다.

2016년 미세먼지($PM_{2.5}$) 총배출량이 상위 20%인 지역은 중구, 강서구, 구로구, 강남구, 송파구였다. 그중 중구는 비도로오염원의 미세먼지($PM_{2.5}$) 배출량 비중이 절반을 차지하였다. 구로구는 비산먼지, 비도로이동오염원, 도로이동오염원 순으로 미세먼지($PM_{2.5}$) 배출량의 비중이 높았다.



2015년 서울시 구별 미세먼지(PM_{2.5}) 총배출량



2016년 서울시 구별 미세먼지(PM_{2.5}) 총배출량

자료: 저자 작성.

〈그림 3-6〉 2015~2016년 서울시 구별 미세먼지(PM_{2.5}) 총배출량

3. 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분별 특성

2015년부터 2017년까지 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 기초통계량 결과는 <표 3-4>와 같으며 계절별(봄, 여름, 가을, 겨울) 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 기초통계량 결과는 <표 3-5>와 같다.

미세먼지(PM_{2.5}) 대비 비율을 살펴보면 탄소성분의 OC 비율이 평균 26%로 가장 높았으며 이온성분의 NO₃⁻(3년 평균 20.54%)와 SO₄²⁻(3년 평균 16.57%)의 비율이 다음으로 높게 나타났다. 미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 3년 평균 24.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 연도별로 증가나 감소의 특정한 경향을 보이지는 않았다. 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분별 특성을 살펴보면 OC 농도의 3년 평균 농도는 6.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2015년부터 2016년까지 지속적으로 다소 증가하는 추세를 보였다. NO₃⁻의 평균 농도는 5.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 3년간 지속적으로 농도가 증가하는 추세를 보였다. 구성성분 중 미세먼지(PM_{2.5}) 중 주요 수용성 이온인 NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺의 2015~2017년 평균 농도는 각각 5.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 3.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 최고값과 최저값의 농도 차이가 다른 물질보다 높았다. 금속이온성분(Ca²⁺, K⁺, Na⁺, Mg²⁺) 중 Ca²⁺가 미세먼지(PM_{2.5}) 대비 비율이 가장 높았으며, 3년 평균 농도는 Ca²⁺(0.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > K⁺(0.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Na(0.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Mg²⁺(0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타났다.

계절별 특성을 살펴보면 미세먼지(PM_{2.5})의 평균 농도는 겨울(28.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 봄(28.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 가을(21.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 여름(21.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순이었다. 탄소성분 중 미세먼지(PM_{2.5}) 대비 비율이 높았던 OC의 계절별 농도 변화를 살펴보면 미세먼지(PM_{2.5})와 마찬가지로 겨울(7.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 봄(6.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 가을(6.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 여름(5.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타났으며, 미세먼지(PM_{2.5}) 대비 비율은 가을이 31.46%로 가장 높았다. 수용성 이온성분 중 농도가 가장 높았던 NO₃⁻의 계절별 변화도 미세먼지(PM_{2.5}) 및 OC와 같이 겨울이 가장 높고 여름이 가장 낮게 나타났으며, 미세먼지(PM_{2.5}) 대비 비율은 겨울이 23.44%로 가장 높았다. 수용성 이온성분 중 하나인 SO₄²⁻의 경우는 앞서 살펴본 구성성분과 달리 여름철 농도가 가장 높았으며, 겨울철 농도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 금속이온성분 중 Ca²⁺와 Mg²⁺는 봄철 농도가 각각 0.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타났다. Cl⁻는 겨울철에 1.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 농도가 가장 높았는데, 이는 겨울철에 사용하는 염화칼슘과 연관성이 있을 것으로 판단된다.

〈표 3-4〉 2015~2017년 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 기초통계량

구분	연도	농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)							PM _{2.5} 대비 비율
		Min	25%	Mean	SD	75%	Max	IQR	
PM _{2.5}	2015	4.85	15.93	23.19	11.44	28.52	70.18	12.59	-
	2016	4.54	18.13	26.18	11.47	32.62	70.63	14.49	-
	2017	3.92	14.69	24.65	14.14	31.41	94.83	16.72	-
	전체	3.92	16.16	24.68	12.46	30.72	94.83	14.56	-
OC	2015	1.52	4.47	6.21	2.50	7.30	17.77	2.83	26.78%
	2016	2.21	4.57	6.22	2.33	7.32	14.41	2.75	23.76%
	2017	1.33	5.23	7.01	2.51	8.38	17.11	3.15	28.44%
	전체	1.33	4.79	6.49	2.48	7.76	17.77	2.97	26.30%
EC	2015	0.00	1.10	1.72	0.93	2.01	5.22	0.91	7.42%
	2016	0.18	0.76	1.34	0.76	1.69	4.76	0.93	5.12%
	2017	0.27	1.00	1.55	0.76	1.92	4.75	0.92	6.29%
	전체	0.00	0.97	1.53	0.84	1.89	5.22	0.92	6.20%
NO ₃ ⁻	2015	0.23	1.69	4.32	3.73	5.85	23.11	4.16	18.63%
	2016	0.16	2.11	5.35	4.54	7.55	33.54	5.44	20.44%
	2017	0.13	1.90	5.54	4.97	8.09	25.11	6.19	22.47%
	전체	0.13	1.87	5.07	4.47	7.07	33.54	5.2	20.54%
SO ₄ ²⁻	2015	0.06	1.99	4.20	3.49	5.28	24.22	3.29	18.11%
	2016	0.33	2.47	4.30	2.64	5.56	16.60	3.09	16.42%
	2017	0.03	1.83	3.77	2.59	5.01	14.57	3.18	15.29%
	전체	0.03	2.10	4.09	2.94	5.36	24.22	3.26	16.57%
NH ₄ ⁺	2015	0.08	1.40	3.02	2.28	4.14	14.55	2.74	13.02%
	2016	0.18	1.90	3.76	2.63	5.17	14.94	3.27	14.36%
	2017	0.03	1.70	3.68	2.67	5.22	14.75	3.52	14.93%
	전체	0.03	1.62	3.49	2.55	4.89	14.94	3.27	14.14%
Ca ²⁺	2015	0.01	0.17	0.38	0.52	0.38	6.84	0.21	1.64%
	2016	0.01	0.07	0.17	0.16	0.21	1.18	0.14	0.65%
	2017	0.02	0.20	0.34	0.22	0.44	2.43	0.24	1.38%
	전체	0.01	0.12	0.30	0.35	0.36	6.84	0.24	1.22%
Cl ⁻	2015	0.01	0.17	0.49	0.41	0.70	2.67	0.53	2.11%
	2016	0.01	0.10	0.41	0.40	0.58	2.16	0.48	1.57%
	2017	0.01	0.18	0.78	4.43	0.65	75.92	0.47	3.16%
	전체	0.01	0.15	0.56	2.58	0.64	75.92	0.49	2.27%
K ⁺	2015	0.01	0.12	0.23	0.14	0.32	0.78	0.2	0.99%
	2016	0.01	0.08	0.21	0.17	0.29	1.57	0.21	0.80%
	2017	0.01	0.05	0.29	0.52	0.32	5.71	0.27	1.18%
	전체	0.01	0.09	0.24	0.33	0.31	5.71	0.22	0.97%
Mg ²⁺	2015	0.01	0.03	0.08	0.08	0.11	0.52	0.08	0.34%
	2016	0.01	0.01	0.05	0.06	0.06	0.58	0.05	0.19%
	2017	0.01	0.02	0.06	0.05	0.09	0.25	0.07	0.24%
	전체	0.01	0.02	0.06	0.06	0.09	0.58	0.07	0.24%
Na ⁺	2015	0.01	0.03	0.06	0.05	0.09	0.59	0.06	0.26%
	2016	0.01	0.03	0.18	0.83	0.07	7.77	0.04	0.69%
	2017	0.01	0.03	0.25	1.14	0.10	13.55	0.07	1.01%
	전체	0.01	0.03	0.16	0.81	0.09	13.55	0.06	0.65%

자료: 저자 작성.

〈표 3-5〉 2015~2017년 계절별 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 기초통계량

구분	연도	농도(μg/m ³)							PM _{2.5} 대비 비율
		Min	25%	Mean	SD	75%	Max	IQR	
PM _{2.5}	봄	7.51	19.50	28.22	12.58	35.27	70.63	15.77	-
	여름	3.92	14.02	21.01	9.60	26.41	47.25	12.39	-
	가을	4.64	12.04	21.04	11.65	26.86	70.18	14.82	-
	겨울	10.14	18.29	28.45	13.57	34.24	94.83	15.95	-
OC	봄	1.33	4.95	6.36	2.11	7.73	14.41	2.78	22.54%
	여름	1.52	4.06	5.13	1.71	5.95	13.54	1.89	24.42%
	가을	2.21	4.88	6.62	2.50	7.81	12.93	2.93	31.46%
	겨울	2.70	5.93	7.89	2.69	9.53	17.77	3.6	27.73%
EC	봄	0.27	1.05	1.44	0.58	1.78	3.68	0.73	5.10%
	여름	0.18	0.71	1.09	0.53	1.36	3.55	0.65	5.19%
	가을	0.00	1.01	1.71	0.99	2.08	5.22	1.07	8.13%
	겨울	0.51	1.25	1.90	0.92	2.37	4.76	1.12	6.68%
NO ₃ ⁻	봄	0.52	2.74	6.39	4.66	9.28	21.33	6.54	22.64%
	여름	0.13	0.82	2.86	2.53	4.15	11.45	3.33	13.61%
	가을	0.24	1.31	4.39	4.14	6.25	23.11	4.94	20.87%
	겨울	0.24	3.10	6.67	5.04	8.89	33.54	5.79	23.44%
SO ₄ ²⁻	봄	0.51	2.79	4.62	2.73	6.05	16.60	3.26	16.37%
	여름	0.18	2.38	4.66	3.40	6.32	18.55	3.94	22.18%
	가을	0.11	1.76	3.79	3.08	5.00	24.22	3.24	18.01%
	겨울	0.03	1.95	3.26	2.18	3.98	13.05	2.03	11.46%
NH ₄ ⁺	봄	0.50	2.09	4.30	2.86	6.17	14.94	4.08	15.24%
	여름	0.03	1.20	2.76	2.07	3.93	10.44	2.73	13.14%
	가을	0.09	1.11	3.06	2.49	4.12	14.55	3.01	14.54%
	겨울	0.08	2.11	3.83	2.44	5.12	14.75	3.01	13.46%
Ca ²⁺	봄	0.01	0.20	0.43	0.43	0.46	3.01	0.26	1.52%
	여름	0.01	0.13	0.22	0.13	0.32	0.72	0.19	1.05%
	가을	0.01	0.08	0.25	0.20	0.37	1.29	0.29	1.19%
	겨울	0.01	0.11	0.29	0.47	0.33	6.84	0.22	1.02%
Cl ⁻	봄	0.02	0.22	0.48	0.31	0.67	2.36	0.45	1.70%
	여름	0.01	0.05	0.18	0.24	0.21	1.64	0.16	0.86%
	가을	0.01	0.14	0.36	0.30	0.52	1.64	0.38	1.71%
	겨울	0.10	0.43	1.22	5.11	1.14	75.92	0.71	4.29%
K ⁺	봄	0.01	0.12	0.21	0.12	0.28	0.72	0.16	0.74%
	여름	0.01	0.02	0.17	0.48	0.13	5.71	0.11	0.81%
	가을	0.01	0.12	0.29	0.39	0.36	3.90	0.24	1.38%
	겨울	0.01	0.20	0.30	0.16	0.38	1.57	0.18	1.05%
Mg ²⁺	봄	0.01	0.03	0.09	0.09	0.12	0.58	0.09	0.32%
	여름	0.01	0.01	0.05	0.04	0.06	0.39	0.05	0.24%
	가을	0.01	0.02	0.05	0.05	0.07	0.25	0.05	0.24%
	겨울	0.01	0.02	0.07	0.06	0.09	0.45	0.07	0.25%
Na ⁺	봄	0.01	0.04	0.18	0.74	0.10	7.66	0.06	0.64%
	여름	0.01	0.02	0.16	0.69	0.06	5.00	0.04	0.76%
	가을	0.01	0.03	0.09	0.26	0.08	2.95	0.05	0.43%
	겨울	0.01	0.03	0.23	1.25	0.10	13.55	0.07	0.81%

자료: 저자 작성.3. 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분별 특성

2015~2017년 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 상관관계를 살펴본 결과는 <표 3-6>과 같다. 미세먼지(PM_{2.5})와 비교적 높은 상관성(0.5 이상)을 보인 것은 이온성분으로 중 NO₃⁻(0.57)와 Cl⁻(0.84)이었으며 금속이온성분 중 K⁺(0.79), Mg²⁺(0.65), Na⁺(0.67)가 높은 상관성을 보였다.

탄소성분의 OC와 상관성이 비교적 높은 구성성분은 NH₄⁺(0.60)이었으며 EC와는 Ca²⁺(0.60)가 상관성이 높았다. NO₃⁻는 금속이온성분인 K⁺(0.57), Mg²⁺(0.78)가 상관성이 높았다. 금속이온 구성성분 간에는 K-Mg(0.57), K-Na(0.53)이 상관성이 비교적 높았다.

<표 3-6> 2015~2017년 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 상관관계

	상관계수										
	PM _{2.5}	OC	EC	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
PM _{2.5}	1.00	0.03	0.04	0.57	0.16	0.06	-0.01	0.84	0.79	0.65	0.67
OC	0.03	1.00	0.09	-0.03	0.03	0.60	0.04	-0.09	-0.08	-0.03	-0.09
EC	0.04	0.09	1.00	0.09	0.04	0.09	0.60	0.02	0.05	0.12	-0.04
NO ₃ ⁻	0.57	-0.03	0.09	1.00	0.24	-0.01	-0.02	0.48	0.57	0.78	0.30
SO ₄ ²⁻	0.16	0.03	0.04	0.24	1.00	0.04	0.00	0.11	0.17	0.27	0.04
NH ₄ ⁺	0.06	0.60	0.09	-0.01	0.04	1.00	0.05	-0.02	-0.02	0.00	-0.06
Ca ²⁺	-0.01	0.04	0.60	-0.02	0.00	0.05	1.00	-0.01	0.05	0.00	-0.05
Cl ⁻	0.84	-0.09	0.02	0.48	0.11	-0.02	-0.01	1.00	0.86	0.49	0.77
K ⁺	0.79	-0.08	0.05	0.57	0.17	-0.02	0.05	0.86	1.00	0.57	0.53
Mg ²⁺	0.65	-0.03	0.12	0.78	0.27	0.00	0.00	0.49	0.57	1.00	0.23
Na ⁺	0.67	-0.09	-0.04	0.30	0.04	-0.06	-0.05	0.77	0.53	0.23	1.00

자료: 저자 작성.

제4장

미세먼지 구성성분의 건강영향 평가

1. 건강영향 평가의 분석 자료 및 분석 방법

가. 분석 범위 및 건강영향 범위

본 연구에서는 2015년부터 2017년까지 서울시를 대상으로 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 농도 증가로 인한 사망영향을 평가하였다. 사망영향은 사망원인에 따라 전체원인과 심혈관계 원인 사망으로 구분하여 건강영향을 분석하였다. 분석대상 인구집단은 연령에 따라 전체연령, 65세 미만 연령집단, 65세 이상 연령집단으로 구분하여 미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향을 평가하였다. 자료는 통계청의 기상자료와 사망자료를 이용하였으며, 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 농도자료는 서울시 보건환경연구원의 자료를 이용하였다.

나. 통계분석 방법

본 연구에서는 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 건강영향을 평가하기 위해 시계열 분석방법을 적용하였다. 시계열 연구는 환경위해요인이 인구집단에 미치는 영향을 파악하는 것으로, 인구학적 요소와 사회경제적 요소인 개인적 특징은 고려하지 않는다.²⁷⁾ 또한 시계열 연구는 시간에 대한 자료이기 때문에 요일과 계절 등은 평활함수를 이용하여 보정해야 한다.²⁸⁾

27) Schwartz(1994), pp.36-52.

28) 김선영(2005), pp.16-17.

미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망영향 분석에서, 종속변수는 일별 사망건수이므로 포아송 회귀모형(Poisson regression model)을 적용하였다. 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망영향을 평가하기 위하여 포아송 회귀모형에 적합하면서 모수적 선형함수와 분석에 영향을 줄 수 있는 혼란변수를 비모수적 평활함수로 통제하였다. 포아송 회귀모형은 다음 식(4-1)과 같다.

$$\text{Ln}E(Y) = \beta_0 + \beta_1(X_1) + \beta_2(X_2) + \beta_3(X_3) + \dots + \beta_i(X_i) \quad \text{식(4-1)}$$

여기서, E(Y) = 종속변수에 대한 기댓값

X_i = 예측변수

β_i = 예측변수에 대한 회귀계수

미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망영향 평가에 영향을 줄 수 있는 요일 변수, 날짜변수, 기상요인, 계절변동, 장기적인 추세변동 등의 혼란변수들을 보정하였다. 비모수적 평활함수를 적용하여 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망영향 평가에 영향을 줄 수 있는 혼란변수에 대하여 비선형적인 경향을 보정하였고, 평활함수는 자연 3차 스플라인 방법을 적용하였다.²⁹⁾

연도변수와 요일별수에 대한 보정은 가변수(dummy variable)로 적용하였다. 연도변수에 대하여 장기적인 추세를 보정하였고, 요일변수에 대하여 요일과 휴일 효과를 보정하였다. 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망영향에 대한 최종 분석모형은 다음과 같다.

$$\text{Ln}E(\text{Daily death count}) = B_0 + B_1(\text{Pollutnat}) + D(\text{Day of week}) + D(\text{Date}) + ns(\text{Temperature}, df = n) + ns(\text{Humidity}, df = n) + ns(\text{Pressure at sealevel}, df = n) \quad \text{식(4-2)}$$

여기서, ns = 각 변수에 대한 자연 3차 스플라인 평활함수

D = 요일에 대한 가변수(Dummy variable)

29) 배현주(2014), pp.346-354.

분석모형은 모형적합도(goodness of fit)의 기준 통계량인 Akaike's information criterion(AIC)을 적용하여 선정하였으며, AIC 값이 가장 작은 모형을 분석모형으로 선정하였다.³⁰⁾

또한 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 건강영향은 미세먼지(PM_{2.5})가 발생한 당일에 바로 건강영향이 나타날 수도 있고, 일정 시간이 경과한 이후에 건강영향이 나타날 수도 있으므로 지연효과(lag effect)를 고려하였다. 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망영향에 대한 지연효과는 건강영향이 발생한 당일부터 최고 7일 전까지를 분석대상으로 하였다. 분석결과에서 최종 지연효과일은 미세먼지(PM_{2.5})와 사망영향의 상관성이 가장 높은 날로 선정하였다. 자료의 정리는 SAS 9.3 version을 이용하였고, 자료를 포아송 회귀모형에 적합시키는 것은 R 3.6.1 version을 적용하였다.

포아송 회귀모형의 시계열 분석결과, 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 단위 농도 증가가 사망에 미치는 정도인 회귀계수(β)를 산출하고, 이를 이용하여 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망영향에 대한 위험비율인 상대위험비(RR: Relative Risk)를 다음과 같이 계산한다.

$$RR = \exp(\beta) \quad \text{식(4-3)}$$

또한 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망영향의 상대위험비(RR)를 이용하여 백분율 변화(percentage change)는 다음과 같이 계산한다.

$$\% \text{ change} = (RR - 1) \times 100 \quad \text{식(4-4)}$$

30) Akaike(1973), pp.267-281.

2. 기본 자료에 대한 분석

본 연구에서는 2015년부터 2017년까지 서울시에 거주하는 전체 연령집단을 대상으로 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가에 따른 사망영향을 정량적으로 평가하기 위하여 통계청의 기상 자료와 사망자료를 이용하였다.

가. 기상요소의 시계열 경향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안의 서울시 일별 기온과 일별 습도에 대한 기초통계량 자료는 <표 4-1>과 같다.

2015년부터 2017년까지 일별 평균 기온은 13.43℃로, 2015년은 다른 연도에 비해 높은 13.62℃였고, 2017년은 상대적으로 낮은 13.07℃였다. 일별 평균 상대습도는 58.89%로, 2015년은 다른 해에 비해 다소 높은 59.78%였고, 2017년은 56.90%로 가장 낮았다.

<표 4-1> 2015~2017년 기상자료의 기초통계량

구분	연도	기상						
		Min	25%	Mean	SD	75%	Max	IQR
기온 (℃)	2015	-8.98	4.08	13.62	10.13	23.04	30.42	18.96
	2016	-14.40	3.33	13.59	11.04	23.30	31.20	19.97
	2017	-9.40	3.00	13.07	10.98	22.60	31.40	19.60
	전체	-14.40	3.39	13.43	10.72	23.05	31.40	19.66
습도 (%)	2015	23.83	49.54	59.78	14.72	70.21	98.17	20.67
	2016	23.80	47.88	59.15	13.96	68.72	95.30	20.84
	2017	21.80	47.00	56.90	14.54	67.60	96.50	20.60
	전체	21.80	47.60	58.89	14.42	68.96	98.17	21.36

자료: 저자 작성.

나. 사망자료의 시계열 경향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안의 서울시 일별 사망자료의 기초통계량은 <표 4-2>와 같다.

전체 연구기간 동안 서울시에서 사고사를 제외한 사망자수는 116,845명이었다. 연령별로 구분하여 살펴보면 65세 이상 연령집단의 사망자수가 90,035명으로 전체 사망의 77.06%를 차지하였고, 65세 미만 연령집단의 사망자수는 26,810명으로 전체 사망의 22.94%를 차지하였다. 또한 성별로 구분하여 살펴보면 남성 사망자는 63,769명으로 전체의 54.58%를 차지하였고, 여성 사망자는 53,076명으로 45.42%를 차지하였다.

사망원인별로 나누어 살펴보면, 심혈관계 사망원인 사망자수는 25,795명으로 전체 사망의 22.08%를 차지하였다. 심혈관계 사망원인 사망자 중에서 65세 이상 연령집단은 20,879명으로 심혈관계 사망자의 80.94%를 차지하였다. 심혈관계 사망원인 사망자 중 남성은 13,388명, 여성은 12,407명으로 남성과 여성이 각각 51.90%와 48.10%를 차지하였다.

〈표 4-2〉 2015~2017년 사망자료의 기초통계량

구분	사망 원인	연도	일별 사망자수						
			Min	25%	Mean	SD	75%	Max	IQR
전체 원인	전체 연령	2015	75	98	106.3	12.32	114	144	16
		2016	72	99	107.2	12.74	115	148	16
		2017	76	98	106.3	11.49	114	142	16
		전체	72	98	106.6	12.19	115	148	17
	65세 미만 연령	2015	13	22	25.28	4.76	28	40	6
		2016	12	21	24.76	5.38	28	43	7
		2017	9	20	23.35	4.56	26	40	6
		전체	9	21	24.46	4.98	28	43	7
	65세 이상 연령	2015	47	73	81.02	10.88	88	118	15
		2016	53	74	82.47	11.10	90.75	113	16.75
		2017	56	76	82.95	10.58	90	122	14
		전체	47	74	82.15	10.87	89.25	122	15.25
심혈 관계 사망 원인	전체 연령	2015	9	19	23.17	5.34	27	41	8
		2016	8	20	23.38	5.16	27	40	7
		2017	10	21	24.05	5.40	27	42	6
		전체	8	20	23.54	5.31	27	42	7
	65세 미만 연령	2015	0	3	4.61	2.20	6	11	3
		2016	0	3	4.52	2.11	6	11	3
		2017	0	3	4.33	2.13	6	13	3
		전체	0	3	4.482	2.15	6	13	3
	65세 이상 연령	2015	6	15	18.56	4.77	22	31	7
		2016	5	16	18.87	4.76	22	35	6
		2017	8	17	19.72	4.77	23	35	6
		전체	5	16	19.05	4.79	22	35	6

자료: 저자 작성.

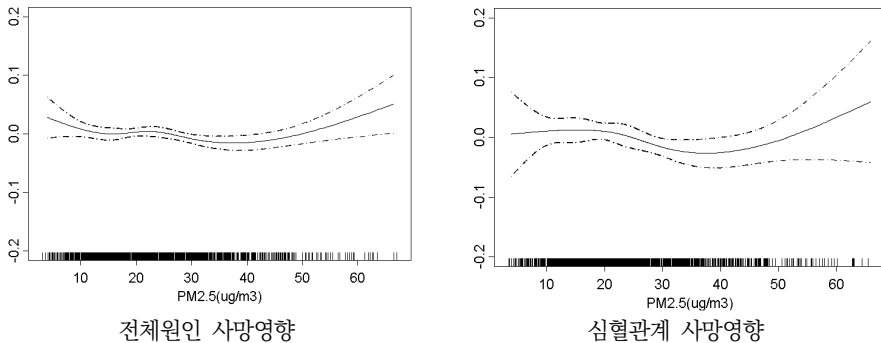
3. 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 사망영향

본 연구에서는 2015년부터 2017년까지 서울시에 거주하는 전체 연령집단을 대상으로 일별 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가가 일별 사망에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였으며, 연구대상 인구집단은 사망원인과 연령에 따라 구분하였다. 사망원인은 전체원인과 심혈관계 사망원인으로 구분하였으며, 연령집단은 전체연령, 65세 이상 연령집단, 65세 미만 연령집단으로 나누어 분석하였다.

미세먼지(PM_{2.5}) 농도와 사망의 건강영향 함수는 당일(lag=0)부터 7일(lag=7) 전까지 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 또는 구성성분의 농도 중에서 사망과의 관련성이 가장 큰 것으로 선정하였다. 미세먼지(PM_{2.5}) 농도와 구성성분의 농도 분포가 매우 상이하므로 미세먼지(PM_{2.5})와 구성성분의 농도 증가에 따른 사망영향은 해당 오염물질의 사분위수(IQR) 농도 증가에 따른 사망영향을 평가하였다.

가. 미세먼지(PM_{2.5})의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 미세먼지(PM_{2.5}) 농도의 사망영향은 <표 4-3>과 같다. 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가에 따른 전체 연령집단의 일별 사망에 대한 Log(상대위험비)함수를 도식화하면 <그림 4-1>과 같다. 그림에서와 같이 일별 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가에 따라 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

<그림 4-1> 미세먼지(PM_{2.5})의 사망원인별 영향

미세먼지(PM_{2.5})의 농도 증가에 따른 사망원인별 사망영향은 <표 4-3>과 같다. 미세먼지(PM_{2.5}) 농도의 사분위수(IQR = 14.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시, 전체원인 사망의 경우 전체연령과 65세 미만 연령집단에서 사망위험이 증가하는 양의 상관성을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다. 미세먼지(PM_{2.5}) 농도의 사분위수(IQR = 14.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시, 65세 이상 연령집단에서 전체원인 사망위험은 2.08%(95% CI : 0.00 ~ 4.22%) 증가하였으며, 통계적으로 유의하였다. 지연효과를 고려하였을 때, 65세 이상 연령집단에서 전체원인 사망위험은 당일의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 사망위험을 높이는 것으로 나타났다.

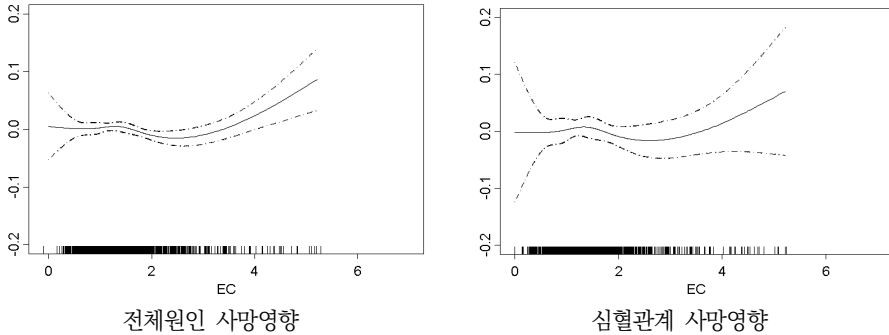
<표 4-3> 미세먼지(PM_{2.5})의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분율 변화(per 14.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	Lag 0	1.85	-0.17 ~ 3.92
	65세 미만 연령	Lag 5	0.67	-0.78 ~ 2.14
	65세 이상 연령	Lag 0	2.08	0.00 ~ 4.22
심혈 관계 사망 원인	전체연령	Lag 4	1.84	-1.17 ~ 5.52
	65세 미만 연령	Lag 3	2.62	-2.85 ~ 8.39
	65세 이상 연령	Lag 3	4.68	0.42 ~ 9.12

자료: 저자 작성.

나. EC의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 EC 농도의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. EC 농도 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가에 따른 전체 연령집단의 일별 사망에 대한 Log(상대위험비)함수를 도식화하면 <그림 4-2>와 같다. 그림에서와 같이 일별 EC 농도 증가에 따라 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

〈그림 4-2〉 EC의 사망원인별 영향

EC 농도의 사분위수(IQR = $0.92\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 사망원인별 사망영향은 〈표 4-4〉와 같다. EC 농도 사분위수(IQR = $0.92\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시, 전체 연령집단에서 전체원인 사망위험은 3.83%(95% CI : 1.67~ 6.04%) 증가하였다. 연령군별로 나누어 살펴보면, EC 농도의 사분위수(IQR = $0.92\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 65세 미만 연령집단에서는 전체원인 사망위험을 2.03% (95% CI : 0.45 ~ 3.64%) 높였고, 65세 이상 연령집단에서는 전체원인 사망위험을 3.51% (95% CI : 1.07 ~ 6.01%) 높였다. 즉, 65세 미만 연령집단보다 65세 이상 연령집단에서 EC 농도 증가 시 사망위험이 높은 것으로 나타났다. 심혈관계 사망위험은 EC 농도 증가에 따라 사망위험이 증가하는 양의 상관성을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다.

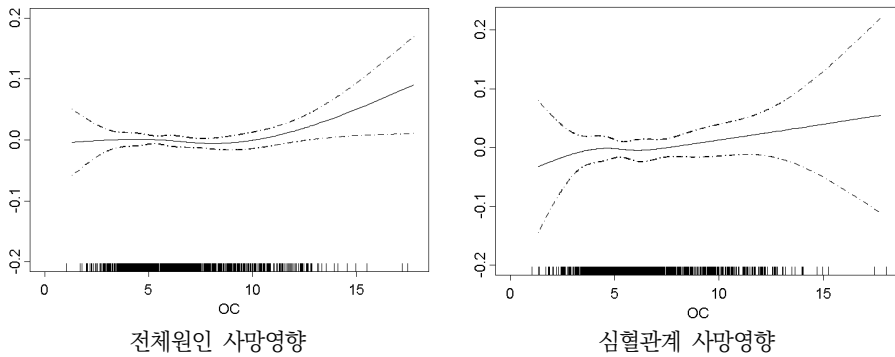
〈표 4-4〉 EC의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분율 변화(per $0.92\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	Lag 1	3.83	1.67 ~ 6.04
	65세 미만 연령	Lag 3	2.03	0.45 ~ 3.64
	65세 이상 연령	Lag 1	3.51	1.07 ~ 6.01
심혈관계 사망 원인	전체연령	Lag 1	5.53	-0.52 ~ 11.94
	65세 미만 연령	-	-	-
	65세 이상 연령	Lag 1	4.33	-0.51 ~ 9.44

자료: 저자 작성.

다. OC의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 OC 농도의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. OC 농도 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가에 따른 전체 연령집단의 일별 사망에 대한 Log(상대위험비)함수를 도식화하면 <그림 4-3>와 같다. 그림에서와 같이 일별 OC 농도 증가에 따라 전체원인과 심혈관계 원인 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

<그림 4-3> OC의 사망원인별 영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구 기간 동안의 서울시 OC 농도의 사분위수(IQR = $2.97\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 사망원인별 사망영향은 <표 4-5>와 같다. OC 농도의 사분위수(IQR = $2.97\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 전체연령에서 전체원인 사망위험은 3.21% (95% CI : 0.44 ~ 6.05%) 증가하였고, 심혈관계 사망위험은 OC 농도 증가에 따라 사망위험이 증가하는 양의 상관성을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다.

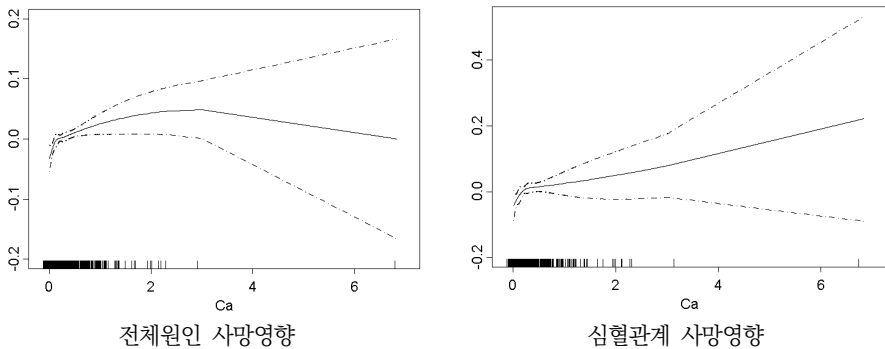
〈표 4-5〉 OC의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분율 변화(per 2.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	Lag 0	3.21	0.44 ~ 6.05
	65세 미만 연령	Lag 4	5.66	-3.23 ~ 15.36
	65세 이상 연령	Lag 3	2.17	0.63 ~ 3.73
심혈 관계 사망 원인	전체연령	Lag 1	1.32	-0.40 ~ 3.07
	65세 미만 연령	-	-	-
	65세 이상 연령	Lag 1	1.98	0.10 ~ 3.89

자료: 저자 작성.

라. Ca^{2+} 의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안의 서울시 Ca^{2+} 농도의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. Ca^{2+} 농도 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가에 따른 전체 연령집단의 일별 사망에 대한 Log(상대위험비)함수를 도식화하면 〈그림 4-4〉와 같다. 그림에서와 같이 일별 Ca^{2+} 농도 증가에 따라 심혈관계 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

〈그림 4-4〉 Ca^{2+} 의 사망원인별 영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 Ca^{2+} 농도의 사분위수(IQR = $0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 사망원인별 사망영향은 <표 4-6>과 같다. Ca^{2+} 농도 사분위수(IQR = $0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 전체 연령에서 전체원인 사망위험은 0.32% 증가하였고, 심혈관계 사망위험은 0.86% 증가하였다. Ca^{2+} 농도 증가에 따라 전체원인과 심혈관계 사망위험이 증가하는 양의 상관성을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다.

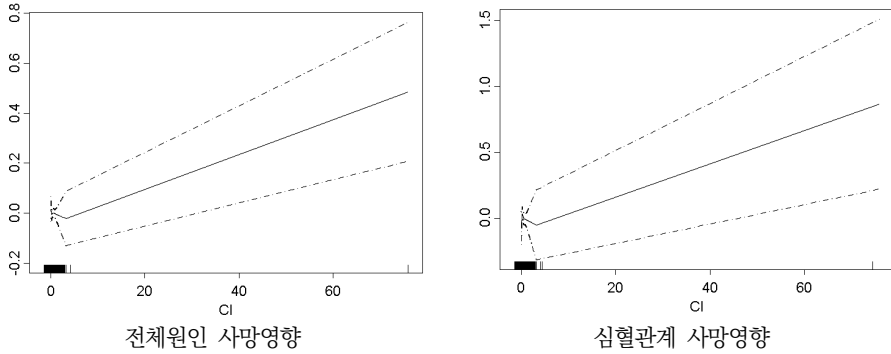
<표 4-6> Ca^{2+} 의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분율 변화(per $0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	Lag 7	0.32	-0.11 ~ 0.77
	65세 미만 연령	Lag 7	0.44	-0.37 ~ 1.25
	65세 이상 연령	Lag 7	0.26	-0.24 ~ 0.76
심혈 관계 사망 원인	전체연령	Lag 3	0.86	-0.04 ~ 1.76
	65세 미만 연령	Lag 6	1.33	-0.45 ~ 3.15
	65세 이상 연령	Lag 7	1.05	-0.62 ~ 2.74

자료: 저자 작성.

마. Cl^- 의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 Cl^- 농도의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. Cl^- 농도 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가에 따른 일별 사망에 대한 $\text{Log}(\text{상대위험비})$ 함수를 도식화 하면 <그림 4-5>와 같다. 그림에서와 같이 일별 Cl^- 농도 증가에 따라 전체원인과 심혈관계 원인 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

〈그림 4-5〉 Cl⁻의 사망원인별 영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 Cl⁻ 농도의 사분위수(IQR = 0.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 사망원인별 사망영향은 〈표 4-7〉과 같다. 65세 미만 연령집단에서 Cl⁻ 농도 사분위수(IQR = 0.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 전체원인 사망위험은 0.58%(95% CI : 0.50 ~ 1.18%) 증가하였고, 심혈관계 사망위험은 0.46%(95% CI : 0.43 ~ 0.90%) 증가하였다. 65세 미만 연령집단에서 Cl⁻ 농도 증가는 전체원인과 심혈관계 사망위험을 통계적으로 유의하게 높였다.

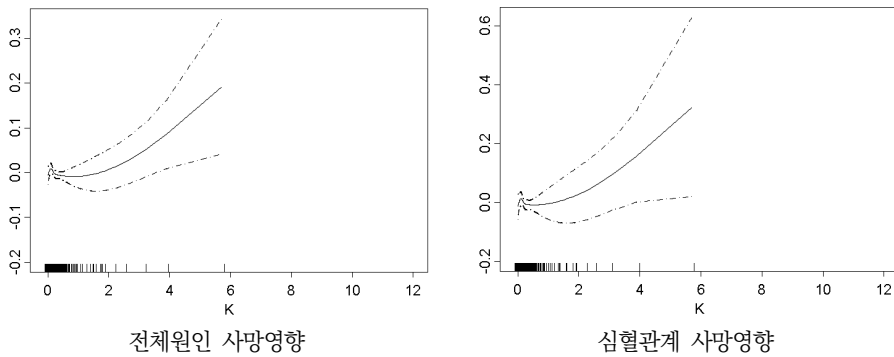
〈표 4-7〉 Cl⁻의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분율 변화(per 0.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	Lag 7	0.05	-0.02 ~ 0.16
	65세 미만 연령	Lag 5	0.58	0.50 ~ 1.18
	65세 이상 연령	Lag 7	0.05	-0.04 ~ 0.17
심혈관계 사망 원인	전체연령	Lag 6	0.08	-0.08 ~ 0.31
	65세 미만 연령	Lag 2	0.46	0.43 ~ 0.90
	65세 이상 연령	Lag 6	0.12	-0.02 ~ 0.37

자료: 저자 작성.

바. K^+ 의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 K^+ 농도의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. K^+ 농도 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가에 따른 전체 연령집단의 일별 사망에 대한 Log(상대위험비)함수를 도식화하면 <그림 4-6>과 같다. 그림에서와 같이 일별 K^+ 농도 증가에 따라 전체 원인과 심혈관계 원인 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

<그림 4-6> K^+ 의 사망원인별 영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 K^+ 농도의 사분위수(IQR = $0.22\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 사망원인별 사망영향은 <표 4-8>과 같다. K^+ 농도 사분위수(IQR = $0.22\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시, 전체연령에서 전체원인 사망위험은 0.36% 증가하였고, 심혈관계 사망위험은 0.76% 증가하였다. 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 구성성분인 K^+ 농도 증가에 따라 사망위험이 증가하는 양의 상관성을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다.

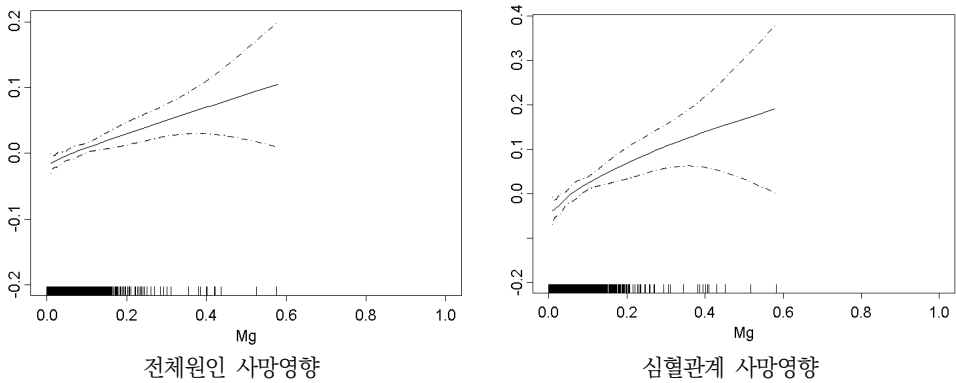
〈표 4-8〉 K⁺의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분율 변화(per 0.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	Lag 5	0.36	-0.09 ~ 0.81
	65세 미만 연령	Lag 2	0.33	-0.59 ~ 1.26
	65세 이상 연령	Lag 5	0.33	-0.19 ~ 0.84
심혈 관계 사망 원인	전체연령	Lag 5	0.76	-0.18 ~ 1.71
	65세 미만 연령	Lag 7	0.76	-1.21 ~ 2.77
	65세 이상 연령	Lag 5	1.08	0.04 ~ 2.12

자료: 저자 작성.

사. Mg²⁺의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 Mg²⁺ 농도의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. Mg²⁺ 농도 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가에 따른 전체 연령집단의 일별 사망에 대한 Log(상대위험비)함수를 도식화하면 〈그림 4-7〉과 같다. 그림에서와 같이 일별 Mg²⁺ 농도 증가에 따라 전체원인과 심혈관계 원인 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

〈그림 4-7〉 Mg²⁺의 사망원인별 영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 Mg^{2+} 농도의 사분위수(IQR = $0.07 \mu g/m^3$) 증가 시 사망원인별 사망영향은 <표 4-9>와 같다. Mg^{2+} 농도 사분위수(IQR = $0.07 \mu g/m^3$) 증가 시 전체 연령에서 전체원인 사망위험은 1.35%(95% CI : 0.58 ~ 2.12%) 증가하였고, 심혈관계 사망위험은 3.50%(95% CI : 1.92 ~ 5.10%) 증가하였다.

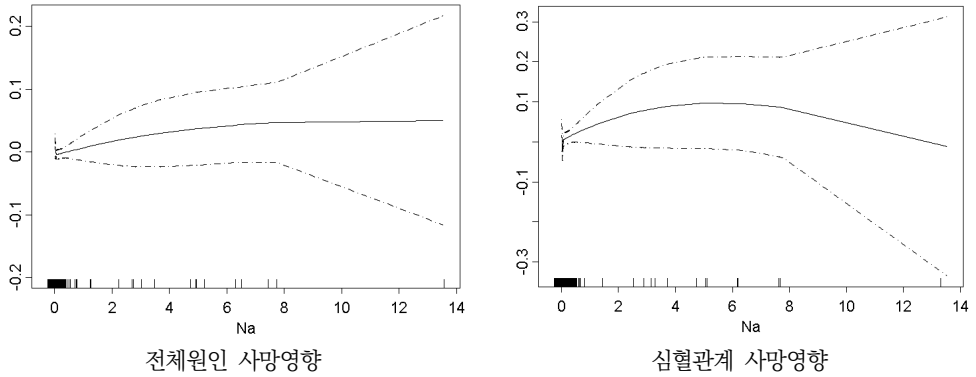
<표 4-9> Mg^{2+} 의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분율 변화(per $0.07 \mu g/m^3$)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	Lag 7	1.35	0.58 ~ 2.12
	65세 미만 연령	Lag 7	1.37	-0.01 ~ 2.77
	65세 이상 연령	Lag 7	1.43	0.56 ~ 2.30
심혈 관계 사망 원인	전체연령	Lag 7	3.50	1.92 ~ 5.10
	65세 미만 연령	Lag 6	4.00	0.82 ~ 7.27
	65세 이상 연령	Lag 7	4.05	2.29 ~ 5.85

자료: 저자 작성.

아. Na^+ 의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 Na^+ 농도의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. Na^+ 농도 $1 \mu g/m^3$ 증가에 따른 일별 사망에 대한 Log(상대위험비)함수를 도식화하면 <그림 4-8>과 같다. 그림에서와 같이 일별 Na^+ 농도 증가에 따라 전체원인과 심혈관계 원인 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

〈그림 4-8〉 Na⁺의 사망원인별 영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 Na⁺ 농도의 사분위수(IQR = 0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 사망원인별 사망영향은 〈표 4-10〉과 같다. Na⁺ 농도 사분위수(IQR = 0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 전체연령에서 전체원인 사망위험과 심혈관계 원인 사망위험이 증가하는 양의 상관성을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다.

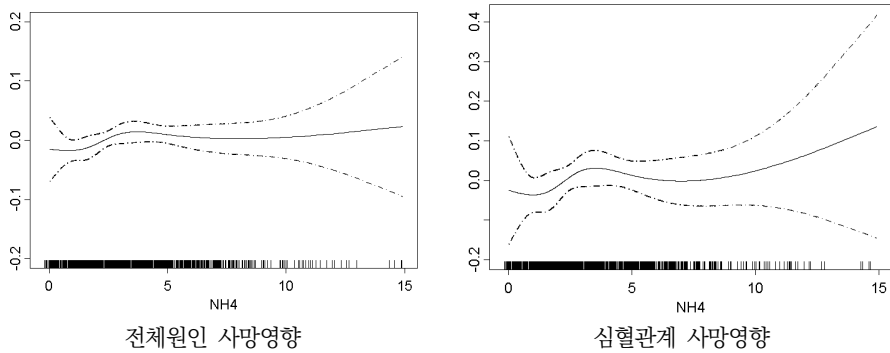
〈표 4-10〉 Na⁺의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분율 변화(per 0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	Lag 2	0.01	-0.04 ~ 0.06
	65세 미만 연령	Lag 5	0.04	-0.07 ~ 0.14
	65세 이상 연령	Lag 2	0.01	-0.04 ~ 0.07
심혈관계 사망 원인	전체연령	Lag 5	0.03	-0.07 ~ 0.13
	65세 미만 연령	Lag 5	0.12	-0.10 ~ 0.35
	65세 이상 연령	Lag 1	0.02	-0.09 ~ 0.12

자료: 저자 작성.

자. NH_4^+ 의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 NH_4^+ 농도의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. NH_4^+ 농도 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가에 따른 일별 사망에 대한 $\text{Log}(\text{상대위험비})$ 함수를 도식화하면 <그림 4-9>와 같다. 그림에서와 같이 일별 NH_4^+ 농도 증가에 따라 전체원인과 심혈관계 원인 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

<그림 4-9> NH_4^+ 의 사망원인별 영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 NH_4^+ 농도의 사분위수(IQR = $3.27\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 사망원인별 사망영향은 <표 4-11>과 같다. NH_4^+ 농도 사분위수(IQR = $3.27\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 전체연령에서 전체원인 사망위험과 심혈관계 원인 사망위험이 증가하는 양의 상관성을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다.

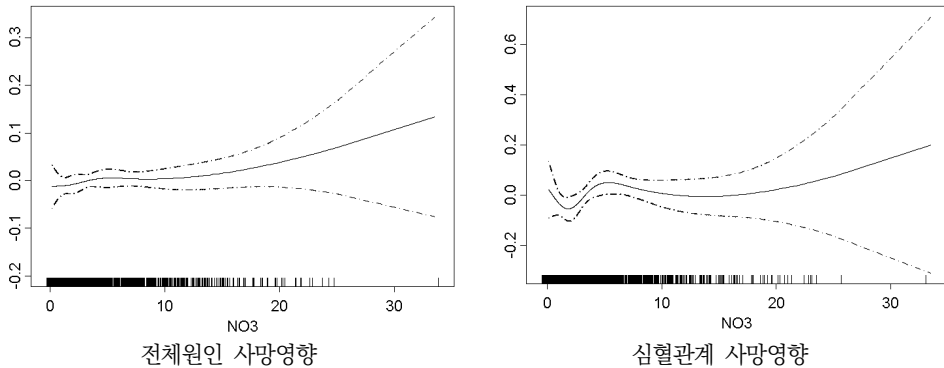
〈표 4-11〉 NH₄⁺의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분을 변화(per 3.27 μg/m ³)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	-	-	-
	65세 미만 연령	Lag 4	0.90	-0.70 ~ 2.52
	65세 이상 연령	-	-	-
심혈 관계 사망 원인	전체연령	-	-	-
	65세 미만 연령	Lag 6	1.60	-2.10 ~ 5.45
	65세 이상 연령	-	-	-

자료: 저자 작성.

차. NO₃⁻의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 NO₃⁻ 농도의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. NO₃⁻ 농도 1μg/m³ 증가에 따른 일별 사망에 대한 Log(상대위험비)함수를 도식화하면 〈그림 4-10〉과 같다. 그림에서와 같이 일별 NO₃⁻ 농도 증가에 따라 전체원인과 심혈관계 원인 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

〈그림 4-10〉 NO₃⁻의 사망원인별 영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 NO_3^- 농도의 사분위수(IQR = $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 사망원인별 사망영향은 <표 4-12>와 같다. NO_3^- 농도 사분위수(IQR = $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가시 전체 연령에서 전체원인 사망위험과 심혈관계 원인 사망위험이 증가하는 양의 상관성을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다.

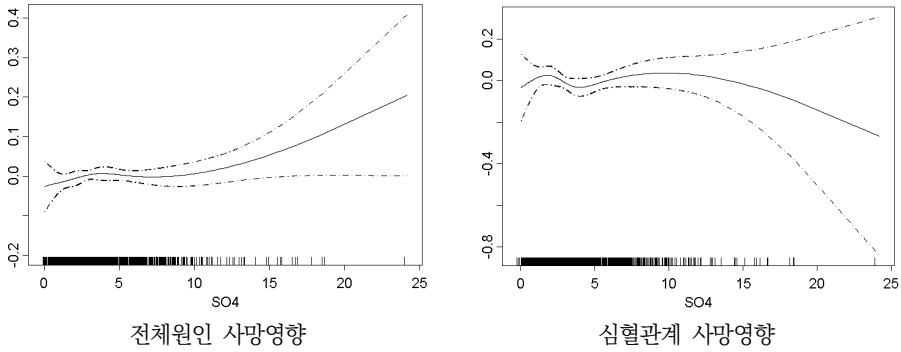
<표 4-12> NO_3^- 의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분율 변화(per $5.2\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	-	-	-
	65세 미만 연령	Lag 4	0.96	-0.55 ~ 2.49
	65세 이상 연령	-	-	-
심혈 관계 사망 원인	전체연령	Lag 1	0.31	-1.35 ~ 2.00
	65세 미만 연령	Lag 6	1.38	-2.12 ~ 4.99
	65세 이상 연령	Lag 1	0.33	-1.53 ~ 2.22

자료: 저자 작성.

카. SO_4^{2-} 의 사망영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구 기간 동안의 서울시 SO_4^{2-} 농도의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. SO_4^{2-} 농도 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가에 따른 일별 사망에 대한 Log(상대위험비)함수를 도식화하면 <그림 4-11>과 같다. 그림에서와 같이 일별 SO_4^{2-} 농도 증가에 따라 전체원인과 심혈관계 원인 일별 사망건수는 양의 관련성을 나타내었다.



자료: 저자 작성.

〈그림 4-11〉 SO_4^{2-} 의 사망원인별 영향

2015년부터 2017년까지 전체 연구기간 동안 서울시 SO_4^{2-} 농도의 사분위수(IQR = $3.26\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 사망원인별 사망영향은 <표 4-13>과 같다. 65세 미만 연령집단에서 SO_4^{2-} 농도 사분위수(IQR = $3.26\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가 시 전체원인 사망위험은 0.52%(95% CI : 1.95 ~ 3.12%) 증가하였고, 심혈관계 사망위험은 1.99%(95% CI : 5.39 ~ 8.73%) 증가하였다. 65세 미만 연령 집단에서 SO_4^{2-} 농도 증가는 전체원인과 심혈관계 사망위험을 통계적으로 유의하게 높였다.

〈표 4-13〉 SO₄²⁻의 사망원인별 사망영향

사망 원인	연령구분	지연효과	백분을 변화(per 3.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
			평균	95% 신뢰구간
전체 원인	전체연령	-	-	-
	65세 미만 연령	Lag 6	0.52	1.95 ~ 3.12
	65세 이상 연령	-	-	-
심혈 관계 사망 원인	전체연령	-	-	-
	65세 미만 연령	Lag 3	1.99	5.39 ~ 8.73
	65세 이상 연령	-	-	-

자료: 저자 작성.

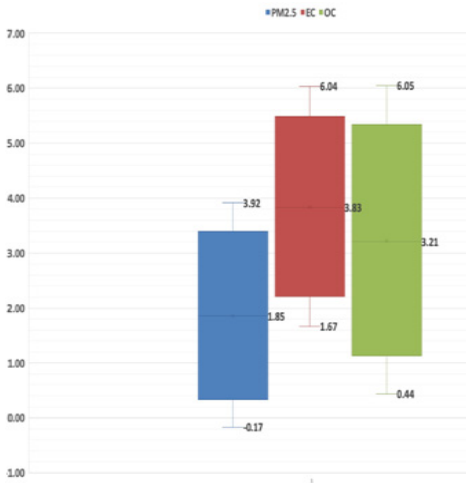
타. 소결

본 연구에서는 2015년부터 2017년까지 서울시를 대상으로 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. 사망영향은 전체원인 사망과 심혈관계 사망영향으로 구분하였고, 연령에 따라서는 전체연령, 65세 이상 연령집단, 65세 미만 연령집단으로 구분하였다.

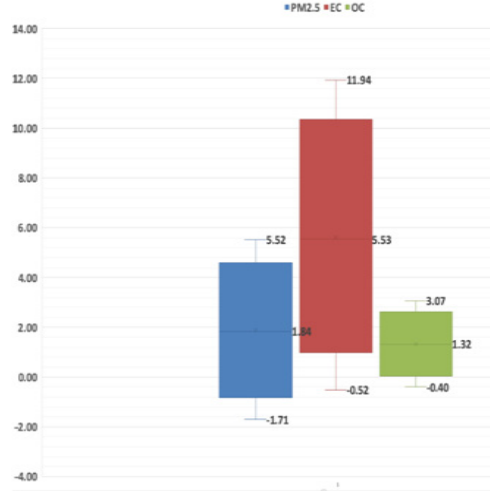
건강영향 평가 결과, 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가는 전체원인 사망위험과 심혈관계 사망위험을 높였으며, 특히 65세 이상 연령집단에서 사망위험을 통계적으로 유의하게 높였다. 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 중 EC와 OC는 전체 연령과 65세 이상 연령집단에서 전체원인 사망위험을 통계적으로 유의하게 높였다. 미세먼지, EC, OC의 사망위험을 비교한 결과는 〈그림 4-12〉와 같다. 특히 EC와 OC의 전체원인 사망위험은 미세먼지(PM_{2.5})의 사망위험보다 높은 것으로 나타나 미세먼지(PM_{2.5})로 인한 인체위해를 저감하기 위해서는 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 개선의 양적 관리뿐만 아니라 질적 관리가 병행되어야 한다.

Cl⁻과 SO₄²⁻는 65세 미만 연령집단에서 전체원인 사망위험과 심혈관계 사망위험을 통계적으로 유의하게 높였다. Mg²⁺는 전체 연령과 65세 이상 연령집단에서 전체원인과 심혈관계

사망위험을 유의하게 높였다. 또한 Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , NO_3^- 의 농도 증가는 전체 원인과 심혈관계 사망위험을 높이는 양의 상관성을 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다.



전체원인 사망영향



심혈관계 사망영향

자료: 저자 작성.

〈그림 4-12〉 미세먼지(PM_{2.5}), EC, OC의 사망위험

제5장

수용체 중심의 미세먼지 관리정책방안

1. 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리정책 국외 사례

가. 미국 남부 캘리포니아³¹⁾

미국 남부 캘리포니아 지역은 1950년대 자동차 배기가스로 인해 발생하는 광화학 스모그로 많은 피해를 겪을 만큼 대기오염이 심각하였다. 이에 캘리포니아주는 이러한 자동차 등의 이동오염원을 집중적으로 관리하는 대기자원위원회(CARB: California Air Resources Board)를 1967년 설립하여 지금까지 관리해오고 있다. 미국에서 가장 먼저 자동차 배기가스 배출기준을 적용한 캘리포니아주는 미국 내 유일하게 자체적인 배기가스 배출기준을 정할 권한이 있으며, 그 기준은 보통 미국 환경청 보다 엄격하게 정해지고 있다.

CARB는 다음과 같이 식별 단계, 위험관리 단계, 규제조치 단계의 세 단계를 통해 규제정책을 마련하였다. 먼저 식별 단계에서 CARB는 1998년 건강영향 평가 결과를 토대로 경유차에서 발생하는 디젤입자를 유독성 대기오염물질로 지정하였다. 해당 건강영향 보고서에서는 디젤 배기가스에 노출된 사람들은 대조군에 비해 기관지염 발생 등이 증가하였으며, 장기 노출에서는 폐 기능이 감소하였고, 장기간 디젤 배기가스에 노출된 근로자들의 경우 폐암 발생위험이 40% 증가하는 것으로 보고하였다.³²⁾ 둘째, 위험 관리 단계에서 CARB는 디젤 자문위원회와 4개의 분과위원회를 구성하여, 건강영향 평가 결과를 근거로 위험관리 지침과 저감계획을 개발하였다. 위원회는 환경청, 공공기관, 산업 관계자, 환경단체와 관심

31) California Air Resources Board, "History", 검색일: 2019.8.5; California Air Resources Board, "California's Diesel Risk Reduction Plan", 검색일: 2019.8.5.

32) CARB(1998), p.4.

있는 대중 등으로 구성되었다. 자문위원회 도움을 받아 CARB는 저감정책과 관리지침을 개발하였으며, 규제조치 단계가 진행되었다.

CARB가 제시한 디젤입자 배출량 저감계획의 목표는 다음과 같다.³³⁾

- Plan 1. 도로, 비도로 및 고정 디젤연료 엔진과 차량 등 모든 디젤 배출원에 대하여 현재 수준에서 디젤입자 배출의 약 90%까지 저감
- Plan 2. 기술적으로 가능한 선에서 기존 디젤연료와 차량 개조
- Plan 3. 디젤연료의 황 함량 수준 15ppm 이하로 설정

이러한 규제목표를 골자로, 캘리포니아는 LA 스모그가 발생한 후 지난 70년 간 자동차 배기가스 정화장치 부착 의무화, 정화장치 정상 작동 여부 검사, 수명이 다 한 장비 교체 시 재정 지원(인센티브 프로그램 운영), 청정연료 연구개발, 도로 배기가스 오염 단속, 자동차 부품시장 감시 및 대형 트럭 그을음 필터 부착 의무화 등을 통해 자동차 배기가스를 규제해 왔다.³⁴⁾ 이와 같은 노력의 결과, 현재 LA의 연평균 미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 11~14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 대기질 수준이 매우 향상되었다.³⁵⁾ 이렇게 향상된 대기질로 인한 건강편익은 특히 어린이에게 뚜렷하게 나타났다. 남부 캘리포니아에서 개선된 대기질로 인해 어린이의 폐 기능이 통계적으로 유의미하게 증진되었고,³⁶⁾ 어린이의 천식 발생위험 또한 20% 감소하였다.³⁷⁾ 또한 캘리포니아의 디젤 저감정책은 대기 중 블랙카본(Black Carbon) 농도를 효과적으로 감축하였다. 블랙카본(Black Carbon) 농도가 1960년대 이후 90% 가까이 감소하면서 매년 약 5,000명의 조기사망을 예방할 수 있게 되었다.³⁸⁾

33) CARB(2000), pp.1-2.

34) California Air Resources Board, "Programs", 검색일: 2019.8.5.

35) CARB(2019), p.46.

36) Gauderman et al.(2015), pp.905-913.

37) Garcia et al.(2019), pp.1906-1915.

38) CARB(2016), p.21.

나. 미국 남부해안대기환경청

미국 캘리포니아 남부해안대기환경청(SCAQMD: South Coast Air Quality Management District)에서는 대기질 관리구역을 설정하여 대기 중 독성물질 노출 시 발암위험성에 대한 연구(MATES: Multiple Air Toxics Exposure Study)를 수행하였다.³⁹⁾ MATES가 수행된 SCAQMD의 관할지역은 차량이 많고 미국 내에서 인구밀도가 두 번째로 높은 도심지역으로, 미국에서 가장 혼잡한 항구로 꼽히는 두 곳의 항구를 포함하고 있다.⁴⁰⁾ SCAQMD에서 발간한 2008년 대기위해성 평가보고서(MATES-III)에 따르면, 디젤 배출가스는 전체 배출량에서 차지하는 비중이 15% 정도에 지나지 않는 반면, 전체 대기위해성의 84%를 기여할 정도로 유독성이 강하게 나타났다.⁴¹⁾ 이후 대기위해성 평가보고서를 토대로 지속적으로 디젤 배출가스를 저감하는 대책들이 추진되었다. 2015년 발표된 MATES-IV 연구결과에서는 저감대책의 효과가 반영되어 전반적인 배출량이 감소하였고, 디젤입자 농도 또한 MATES-III에 비해 약 70% 감소하였으며, 디젤입자의 발암위해성 기여도 역시 68%로 뚜렷하게 감소한 것으로 보고하였다.⁴²⁾

다. 유럽연합

유럽연합은 대기환경 관리 및 대기질 개선을 위해 2001년 국가별 배출량 상한지침(National Emission Ceilings Directive)을 채택하였다. 이 지침은 28개 회원국의 대기오염물질 배출량을 제한하여 유럽 전반의 대기환경을 관리하고자 하는 유럽연합의 법적 수단으로 2001년에 채택된 지침에는 이산화황(SO₂), 질소산화물(NO_x), 휘발성 유기화합물(NMVOCs), 암모니아(NH₃)의 배출 감축량을 설정하였다.⁴³⁾ 미세먼지(PM_{2.5})에 의한 단기 및 장기 노출에 의한 인체영향이 지속적으로 보고되었고, 건강피해를 감소시키기 위하여

39) South Coast Air Quality Management District, "Health Studies", 검색일: 2019.8.5.

40) South Coast Air Quality Management District, "Clean Port", 검색일: 2019.8.5.

41) SCAQMD(2008), pp.2-10, pp.Appendix VII 6-16.

42) SCAQMD(2015), pp.2-10-2-11.

43) EUR-Lex, "Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on National Emission Ceilings for Certain Atmospheric Pollutants", 검색일: 2019.9.6.

2016년에 개정된 지침에는 미세먼지(PM_{2.5})를 포함하게 되었다.⁴⁴⁾ 개정된 지침은 미세먼지(PM_{2.5})를 포함한 다섯 가지 물질에 대해 2020년과 2030년을 목표로 배출 감축량을 설정하였다.⁴⁴⁾ 추가로 지침에서는 미세먼지(PM_{2.5}) 배출 저감조치를 취할 때 지구온난화에 영향을 미치며 건강피해를 야기시키는 블랙카본(Black Carbon) 배출을 우선적으로 검토할 것을 명시하였다.⁴⁵⁾ 이는 블랙카본(Black Carbon)의 배출량 저감에 대한 구체적인 내용은 없으나 법적 수단에서 처음 블랙카본(Black Carbon)을 제시한 것이다.⁴⁵⁾

유럽연합 28개국의 대기오염물질 저감비율은 <표 5-1>과 같다. 유럽연합은 2020년까지 2005년 대비 이산화황(SO₂) 59%, 질소산화물(NO_x) 42%, 미세먼지(PM_{2.5}) 22%, 휘발성 유기화합물(NMVOCs) 40%, 암모니아(NH₃) 8%를 감축하여야 한다.⁴⁶⁾ 2017년 발간된 지침에 대한 평가보고서에서는 2016년 국가별 배출량 상한지침에서 2030년의 미세먼지(PM_{2.5})와 암모니아에 대한 배출량 저감이 기존 규제에 의한 기대 저감보다 높게 제시되어 있다. 이에 따라 다른 오염물질보다 미세먼지(PM_{2.5})와 암모니아의 국가별 배출량 상한지침을 달성하기 위하여 회원국은 기존 규제에 따른 조치 이상의 추가적인 조치를 계획해야 한다.⁴⁷⁾

<표 5-1> 2005년 대비 유럽연합 28개국의 대기오염물질별 저감비율

EU28	2005	2012	2020NEC	2030 CLE ¹⁾	2030 NEC	2030 MTFR ²⁾
	전체 배출량(kt)	달성한 저감률	지침에서 요구하는 저감률	법규이행에 따른 기대 저감률	지침에서 요구하는 저감률	기술적용에 따른 기대 저감률
SO ₂	7710	-48%	-59%	-74%	-79%	-84%
NO _x	11531	-27%	-42%	-63%	-63%	-73%
PM _{2.5}	1414	-12%	-22%	-32%	-49%	-62%
NH ₃	3878	-5%	-6%	-8%	-19%	-35%
NMVOC	8775	-24%	-28%	-40%	-40%	-61%

주: 1) Current Legislation(CLE), 현재 규제기준.

2) Maximum Technically Feasible Reductions(MTFR), 가용기술적용.

자료: EEB(2017), p.14.

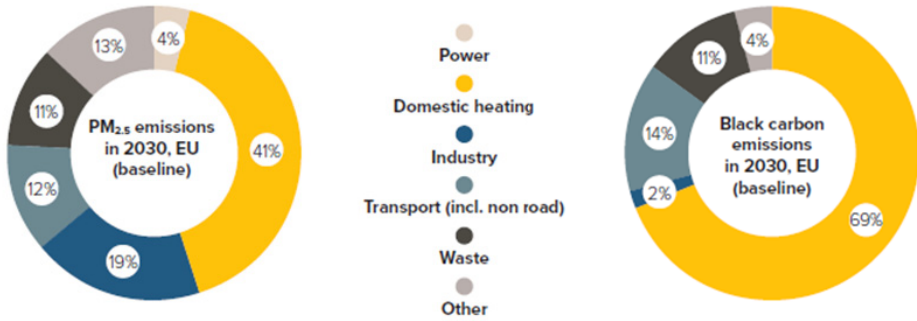
44) EEB(2017), pp.10-11.

45) EEB(2017), p.18.

46) EEB(2017), p.14.

47) EEB(2017), p.15.

국가별 배출량 상한지침의 평가보고서에서는 목표 배출량을 감축하기 위한 중요 분야로 농업, 난방, 석탄발전, 디젤과 가솔린 차량의 대기질 기준 강화를 제시하였고, 특히 미세먼지(PM_{2.5}) 배출에 있어 난방에 의한 배출이 2030년 41%를 차지하고 블랙카본(Black Carbon)의 경우는 69%를 차지할 것으로 예상하였다(그림 5-1 참조).⁴⁸⁾



자료: EEB(2017), p.30.

〈그림 5-1〉 유럽연합의 미세먼지(PM_{2.5})와 블랙카본 배출(2030년 예상)

국가별 배출량 상한지침의 평가보고서에서는 회원국이 난방과 관련한 배출량을 줄이기 위해 취할 수 있는 조치내용을 다음과 같이 제시하였다.⁴⁸⁾

- 경제적 인센티브를 사용하여 기존 가정용 연소시설을 더 나은 주택 단열, 열 펌프, 태양열 난방, 새로운 목재펠릿 시설로 교체하거나 도시에서 재생가능한 에너지를 기반으로 한 지역난방으로 대체
- 주거지역에서 가정용 고체연료 연소를 금지 또는 제한하고 배기정화기술의 사용 장려
- 소비자들에게 스토브의 적합한 설치와 효율적인 작동방법을 교육(스토브가 제대로 작동하지 않으면 미세먼지(PM_{2.5}) 배출량이 250배까지 높아질 수 있음)
- 환경친화적인 스토브 및 보일러에 대해 소비자에게 알리기 위한 라벨 적용
- 효과적인 배출 감소를 위해 감시자원 확대

48) EEB(2017), p.30.

2. 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리로 패러다임의 전환

정부는 2017년 9월 “2022년까지 국내 배출량 30% 감축”을 목표로 ‘미세먼지 관리 종합 대책’을 수립하였다. 2019년 2월에는 미세먼지 및 미세먼지 생성물질의 배출을 저감하고 그 발생을 지속적으로 관리함으로써 미세먼지가 국민건강에 미치는 위해를 예방하고 대기 환경을 적정하게 관리·보전하여 쾌적한 생활환경을 조성하는 것을 목적으로 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」이 시행되었다. 이와 같은 미세먼지 저감을 위한 대책과 관련 법령에서 배출량을 감축하기 위한 내용을 명시하고 있다. 또한 앞서 국외 사례에서 살펴보았듯이 미국과 유럽 등에서는 미세먼지의 구성성분별 건강영향 연구를 진행하여, 미세먼지의 구성 성분 중 건강위해성이 높은 성분과 발생원을 파악하는 연구가 진행되었다.

미세먼지 관리는 궁극적으로 국민의 건강피해를 감소시키고 쾌적한 환경을 조성하기 위한 것으로, 목적을 달성하기 위해서는 우선적으로 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리로 패러다임의 전환이 필요하다. 현재 미세먼지 농도 개선을 위해 다양한 정책이 마련되어 추진되고 있으나, 미세먼지 배출량과 농도에 대한 총량적 접근의 양적 관리 중심으로 이루어지고 있다. 국민건강을 보다 효과적으로 보호하기 위해서는 미세먼지 중 인체위해성이 큰 구성성분에 대한 우선적 관리 등의 질적 접근이 병행되어야 한다.

3. 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리방안의 도입

가. 미세먼지와 구성성분의 측정 및 정보제공

정확하고 체계적인 미세먼지와 구성성분에 대한 농도 측정과 정보 제공은 미세먼지 대기질 관리와 관련한 기본적인 요소이다.

유럽연합 집행위원회(European Commission)는 유럽의 대기질 개선을 위하여 1996년 대기질 기본지침(AQFD: Air Quality Framework Directive)을 마련하였으며, 2008년에 마련된 The fifth Directive (2008/50/EC)는 기존 대기질 관련 지침을 통합하고 미세먼지(PM_{2.5})에 대한 기준을 설정하였다.⁴⁹⁾ 이 지침은 건강과 환경에 대한 유해한 영향 피해를 감소시키고 예방하는 것을 목표로 하였으며, 이를 위해 회원국의 대기질 평가 및 주변 대기질에 대한 정보를 얻는 방법을 마련하였다.⁵⁰⁾

지침은 도시 배경, 도로변 측정망 운영과 함께 농촌 배경(Rural Background) 농도를 측정하도록 명시하였다. 농촌 배경농도 측정의 주요 목표는 농촌 배경에서 적절한 정보가 제공되도록 하는 것이다.⁵¹⁾ 농촌 배경농도 측정정보는 더 오염된 지역(도시 배경, 산업 관련 지점, 교통 관련 지점)에서 미세먼지 농도 수준을 판단하고, 대기오염물질의 장거리 운송으로 인한 기여도 평가에 활용할 수 있다.⁵¹⁾ 지침은 미세먼지 측정의 화학적 조성을 특성화하기 위해 총질량을 포함한 10가지 구성성분을 포함시키도록 하였으며, 구체적인 목록은 <표 5-2>와 같다.⁵¹⁾

<표 5-2> 유럽 대기질 기본지침 미세먼지(PM_{2.5}) 측정 시 구성성분

SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Elemental Carbon(EC)
NO ₃ ⁻	K ⁺	Cl ⁻	Mg ²⁺	Organic Carbon(OC)

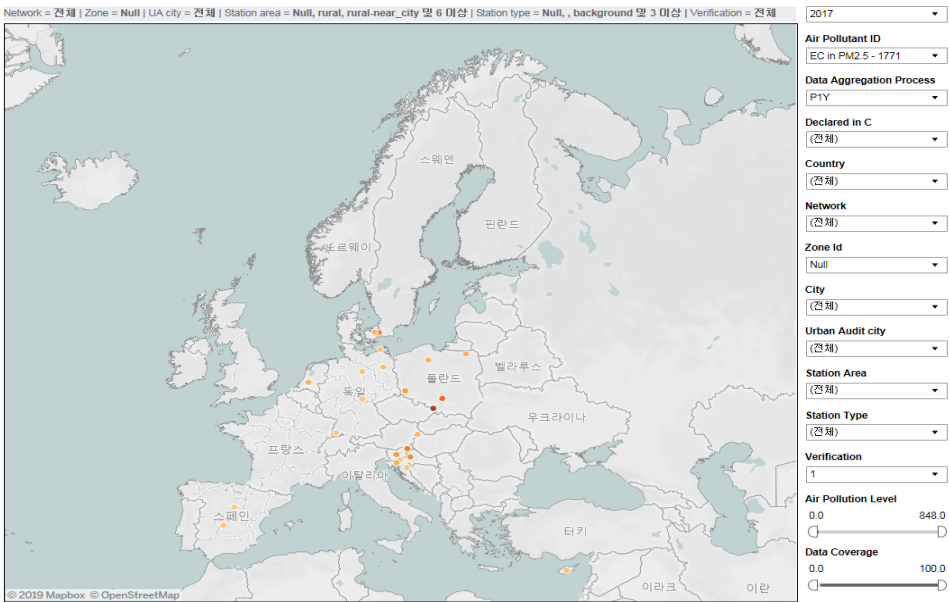
자료: European Commission(2008), p.L 152/20.

49) European Commission, "Air Quality - Existing Legislation", 검색일: 2019.9.6.

50) ECOLEX, "Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe", 검색일: 2019.9.6.

51) European Commission(2008), p.L 152/20.

또한 유럽연합은 매년 유럽연합 회원국의 대기기준 달성 여부 및 대기질 현황과 관련하여 “Air Quality in Europe” 보고서를 발표하고 있으며, 2018년 최근 보고서에는 미세먼지 (PM_{2.5})의 구성성분별 측정농도를 포함하였다.⁵²⁾ 유럽환경청은 대기오염물질별 농도현황에 대한 정보를 <그림 5-2>와 같이 제공하고 있으며, 특히 기본 대기오염물질(이산화황, 이산화질소, 질소산화물, 입자상물질, 납, 오존) 이외에 특정 유해대기오염물질 및 미세먼지 (PM_{2.5})의 구성성분별 정보를 전문가용으로 제공하고 있다.



자료: European Environment Agency, “Air Quality Statistics - Expert Viewer”, 검색일: 2019.9.6.

<그림 5-2> 유럽연합 농촌 배경농도 지점별 미세먼지(PM_{2.5})의 EC 농도

앞서 살펴보았듯이 유럽연합의 대기질 기본지침에서는 농촌 배경농도 측정망에서 미세먼지 (PM_{2.5}) 측정 시 포함되어야 할 구성성분을 명시하고 있다. 우리나라의 경우 도시대기측정망, 교외대기측정망, 국가배경측정망 등 일반 대기오염측정망에서는 대기환경기준 물질을(SO₂, CO, O₃, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}) 중심으로 측정하고 있으며, 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 대한

52) EEA(2018), pp.26-28.

측정은 이루어지고 있지 않은 실정이다. 서울시의 경우도 2개 구에서만 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 대한 측정이 이루어지고 있다. 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 농도를 측정하기 위해서는 막대한 재원이 소요되고, 해당 분야 전문인력이 필요하지만, 미세먼지 관리의 기본적 요소라 할 수 있는 농도와 구성성분의 정보를 파악하기 위해서는 구성성분 측정이 반드시 필요하다.

우리나라의 경우 대기오염물질 정보는 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr>) 시스템을 통하여 제공받을 수 있다. 유럽연합은 정보제공에 있어 일반인과 전문가용을 동일한 사이트에서 따로 제공하고 있는데, 일반인의 경우는 대기환경기준물질을 중심으로 정보를 제공하는 것에 반해 전문가용에서는 측정방법, 오염물질의 구성성분 등 다양한 형태로 정보를 제공하고 있다. 정보제공에 있어 미세먼지 농도 등 대기환경기준물질은 일반인도 쉽게 정보를 얻을 수 있도록 해야겠지만, 구성성분과 같이 세분화되고 과학적인 사용이 필요한 항목에 대해서는 별도의 정보제공이 이루어질 수 있어야 한다. 사용목적이 달라질 수 있는 전문가와 일반인 등 사용자 특징에 따른 콘텐츠 구성이 필요하다.

나. 미세먼지와 구성성분의 건강영향 평가

앞서 국외 사례에서 살펴보았듯이 미국 환경보호청(EPA)은 미국의 국가대기질 기준(NAAQS: National Ambient Air Quality Standards)에 대하여 5년마다 검토하고 있으며, 최근 2018년에 미세먼지(PM_{2.5})에 대한 통합과학평가(Integrated Science Assessment)를 실시하였다. 미세먼지(PM_{2.5}) 대기질 기준의 과학적인 평가를 위하여 미세먼지(PM_{2.5}) 관련 발생원, 화학적 성분, 분포 등 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 전반적 특성 파악, 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분별 건강영향에 대하여 종합적 검토가 이루어졌다.⁵³⁾

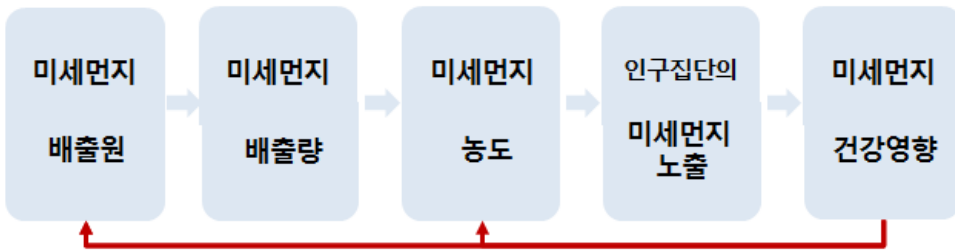
미세먼지(PM_{2.5})에 대한 양적인 관리뿐만 아니라 질적 관리를 위해서는 미세먼지(PM_{2.5})의 배출원의 배출요인, 배출량, 미세먼지(PM_{2.5}) 및 구성성분별 농도 특성이 분석되어야 하며, 이를 통한 인구집단의 미세먼지(PM_{2.5}) 노출과 위해도 분석이 필요하다(그림 5-3 참조).

본 연구의 제2장에서 살펴보았듯이 미국이나 유럽 등 선진국에 비하여, 국내 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분 또는 오염원(source profile)의 건강영향 평가는 아직 많은 연구가

53) U.S. EPA(2018), pp.ES-1-ES-22.

수행되지 않았으며, 일부 수행된 연구도 서울지역에서만 수행된 것으로 나타났다.

기존의 미세먼지($PM_{2.5}$) 관리대책은 배출량 저감을 통한 미세먼지($PM_{2.5}$) 농도를 저감하는 양적 대책으로 추진되었다. 그러나 배출량 저감을 통한 미세먼지($PM_{2.5}$) 농도를 저감하기 위해서는 상당히 많은 자원과 시간이 소요된다. 국민의 건강을 보다 효과적으로 보호하기 위해서는 미세먼지($PM_{2.5}$)와 구성성분의 건강영향을 평가하고, 이 결과를 토대로 건강피해가 우려되는 미세먼지($PM_{2.5}$) 구성성분을 파악하고, 해당 구성성분을 배출하는 주요 배출원을 우선적으로 관리하는 미세먼지($PM_{2.5}$) 질적 관리도 병행되어야 한다. 미세먼지($PM_{2.5}$)와 미세먼지($PM_{2.5}$) 구성성분의 인체위해도 분석 결과를 토대로, 미세먼지($PM_{2.5}$) 배출원 특성에 따른 관리대책을 마련하는 미세먼지($PM_{2.5}$) 질적 관리를 위한 과학적 근거가 될 수 있다.



자료: 저자 작성.

〈그림 5-3〉 인체위해 저감을 위한 미세먼지 건강영향 연구

본 연구에서는 서울시의 미세먼지($PM_{2.5}$) 농도 특성과 배출량 특성, 미세먼지($PM_{2.5}$) 구성성분별 특성을 파악하였으며, 이에 따른 사망원인별 사망영향을 분석하였다. 지역별로 배출량의 차이가 발생하였으며, 구성성분에 따른 사망영향도 차이가 발생하였다. 현재 우리나라의 미세먼지($PM_{2.5}$) 구성성분에 따른 건강영향 연구는 초기단계이지만 국외에서는 미세먼지($PM_{2.5}$) 총질량보다 특정 구성성분에 의한 건강피해가 더 높게 나타난 사례도 있어 미세먼지 총질량에 대한 분석뿐만 아니라 구성성분의 특성 파악 및 구성성분별 건강영향 평가가 필요하다.

또한 국외 연구 사례에서 알 수 있듯이 사망이나 상병과 연관성이 있는 미세먼지($PM_{2.5}$)의 구성성분이나 오염원의 종류뿐만 아니라 연관성의 크기가 계절과 지역, 연구되는 시점, 사망

혹은 상병의 원인에 따라 다르게 나타나는 것이 확인됨에 따라 향후 국내 미세먼지(PM_{2.5}) 조성 및 오염원에 따른 건강영향 평가에서는 다양한 지역을 포함하는 연구가 수행되어야 할 것이다. 특히 미세먼지(PM_{2.5})를 구성하는 물질의 성분과 독성에 따라 지연효과가 다르게 나타나기 때문에 지연효과 역시 충분히 고려하여야 한다. 연구결과의 해석에 있어 연구에서 선택된 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분과 건강의 연관성은 선택된 구성성분이 실제 건강과의 인과관계가 있을 수도 있지만 성분 간 강한 연관성으로 인해 이는 다른 성분들, 즉 분석에서 제외된 성분이나 분석된 구성성분과 유사한 성분의 영향일 수도 있음을 유의하여야 할 것이다.

미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 영향을 평가하는 방법은 크게 개별성분이 건강에 미치는 영향을 평가하는 방법과, 미세먼지의 건강영향의 크기가 각 구성물질의 기여율에 따라 달라지는지 분석하는 effect modification 효과 평가방법으로 나뉜다. 최근까지 수행된 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분과 관련한 대부분의 연구는 단일 구성성분 모델을 활용하였다. 하지만 이러한 단일 구성성분 모델은 미세먼지(PM_{2.5}) 질량과 구성성분의 잠재적 교란효과를 설명하는데 한계가 있다.

사람들은 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 동시에 복합적으로 노출된다. 따라서 미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 복합노출에 따른 건강영향을 정량적으로 평가하고, 이를 통하여 건강영향에 미치는 요인을 모두 파악하여 건강변수를 예측할 수 있는 모형을 만들어야 한다. 다양한 시도가 있지만, 그중 가장 많이 사용되는 것은 여러 개의 변수 중에서 가장 설명력이 높은 변수들을 모아서 한 개의 지표로 (가중치 포함) 만드는 것이다. 이 또한 단점은 어떤 특정한 오염물질을 대상으로 저감정책을 세우기가 어렵다는 것이다. 하지만 건강영향과 관련성이 높은 물질들을 대상으로 총체적인 정책을 세운다면 이 결과들은 정책에 도움을 줄 수 있다.

4. 인체위해 저감을 위한 배출원 맞춤형 관리대책 추진

이상적인 미세먼지(PM_{2.5}) 배출 감축전략을 위해서는 배출원에 따른 미세먼지와 구성성분에 대한 기여도를 고려하여 관리대책의 추진 가능 범위를 확인하여야 하며, 배출원의 위치, 배출오염물질과 같은 다양한 제한요인을 고려하여 지역별 배출원 맞춤형 관리대책을 추진할 필요가 있다.

미세먼지(PM_{2.5})는 연료연소, 도로오염원, 생물성 연소 등 다양한 배출원에서 배출되고 있으며, 미세먼지(PM_{2.5}) 관리 실효성을 높이기 위해서는 배출원 맞춤형 관리대책을 수립해야 한다. 유럽위원회의 지원을 받아 지중해 연안국가에서 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분에 따른 건강영향을 평가한 “MED-PARTICLES” 프로젝트에서는 미세먼지 배출원별 주요 구성성분으로 교통 관련 구성성분에는 원소탄소(EC)가 포함되며, 도로 먼지에는 철(Fe), 망간(Mn), 티타늄(Ti)이, 연료 및 석유 연소 관련 주요 미세먼지 구성성분으로는 니켈(Ni)이 포함되었다.²¹⁾ 또한 건강영향 결과 교통과 도로 비산먼지에 의한 사망영향이 연관성이 있는 것으로 나타나 건강영향 피해를 최소화하기 위하여 배출원에 대한 미세먼지 관리전략을 마련해야 한다고 제안하였다.⁵⁴⁾

지역별로 배출원에 따른 미세먼지(PM_{2.5})와 구성성분 농도의 기여도를 파악하고 미세먼지에 의한 건강피해 정도를 파악하여 관리대책을 수립할 수 있다.

예를 들어 도로오염원에 의한 미세먼지(PM_{2.5})와 구성성분의 기여도가 높은 지역의 경우 독일의 차량등급에 따라 도시 출입가능 여부를 정하는 “환경보호구역(Unweltzone) 제도” 도입 등의 관리대책을 마련할 수 있다. 독일의 경우 “환경보호구역 제도”를 통한 효과로 작센주의 드레스덴(환경보호구역이 없는 곳)과 라이프치히(환경보호구역이 있는 곳)의 원소탄소는 각각 10~30%, 32~51% 감소된 것으로 나타났다.⁵⁵⁾ 또한 베를린의 경우 2010년에는 평년 대비 미세먼지(PM_{2.5})와 질소산화물이 각각 40%, 20% 감소하였으며, 도로교통에서는 디젤 배출이 약 60%(173톤) 감소한 것으로 발표되었다.⁵⁵⁾

도로오염원의 배출량 감소와 관련하여 교통규제대책도 마련할 수 있다. 남부 캘리포니아는

54) The MED-PARTICLES Project(2013), p.9.

55) Umweltbundesamt, “Umweltzonen in Deutschland”, 검색일: 2019.9.6.

지난 20년 간 버스와 트럭의 청정 엔진 및 연료 사용, 노후화 차량 퇴출, 캘리포니아주의 스모그 점검 프로그램 등을 시행하였으며, 그 결과 남부 캘리포니아에서 미세먼지는 13~54% 감소하고 캘리포니아의 개선된 대기질은 어린이의 폐 기능 증진에 통계적, 임상적으로 유의미한 향상을 보였다.⁵⁶⁾

고기구이, 숯가마 등에 의한 생물성 연소의 미세먼지 농도와 구성성분이 높을 경우 깨끗하고 효율적인 요리 및 난방 기술의 사용을 늘리고 배출량 완화를 위해 클린 쿠킹 솔루션 프로그램 대책을 마련할 수 있다. 건설기계 운행에 따른 비산먼지에 의한 미세먼지 발생량의 기여도가 높은 지역의 경우 비산먼지 관리 강화 등을 우선적으로 검토할 수 있다.

이러한 배출원 맞춤형 관리정책을 위해서는 오염의 기여도를 평가하는 연구들이 선행되어야 한다. 미세먼지($PM_{2.5}$)를 구성하는 물질들의 오염원(Source Profiles)을 평가하기 위한 연구에서는 대부분 PCA(Principal Component Analysis), PMF(Positive Matrix Factorization), CMB(Chemical Mass Balance), UNMIX 등의 수용체 모델이 사용되었다. 이들 중 일부 연구에서는 Receptor Model에서 추정된 오염원의 지역 내 위치를 파악하기 위해 CPF(Conditional Probability Function) 또는 NPR(Non-Parametric Regression) 방법을 이용하였으며, 국외 오염원의 위치를 파악하기 위해 PSCF(Potential Source Contribution Function) 방법을 이용하고 있다. 국내에 타당한 분석방법을 적용하여 다양한 미세먼지($PM_{2.5}$)의 배출원 기여도를 보다 정확하게 평가하여야 인체위해를 저감할 수 있는 배출원 맞춤형 관리정책이 마련될 수 있다.

56) Gauderman et al.(2015), pp.905-913.

제6장

요약 및 결론

1. 요약

본 연구에서는 국내의 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분 특성과 건강영향 연구 사례를 검토하고, 이를 바탕으로 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 특성 분석과 미세먼지 구성성분에 따른 건강영향을 정량적으로 평가하였으며, 인체위해성 저감을 위한 수용체 중심의 미세먼지(PM_{2.5}) 관리정책방안을 제안하였다.

미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 특성과 관련한 연구 사례에서는 구성성분의 대표적인 화학성분을 살펴보고 국내 지역별로 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분과 차지하는 비율을 파악하였으며, 미세먼지(PM_{2.5}) 발생의 주요 오염원을 살펴보았다. 국내의 미세먼지(PM_{2.5})의 주요성분은 질산염, 황산염, 암모늄, 유기탄소, 원소탄소로 나타났으며 지역별로 각 주요성분이 차지하는 비율은 상이하였다. 각 연구마다 조사되는 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분 및 오염원의 특성 등이 달라 연구 간 직접 비교는 어렵지만 2차생성 오염물질과 도로이동오염원에서 발생하는 오염물질의 미세먼지(PM_{2.5}) 기여율이 큰 것으로 나타났다.

미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 건강영향 연구 사례에서는 미국 뉴욕대학교 의과대학, 건강영향연구소, 미국 환경청의 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분별 건강영향 연구 내용을 구체적으로 살펴보았다. 또한 유럽 지중해 연안국가를 대상으로 이루어진 “MED-PARTICLES” 프로젝트의 지역별 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 농도와 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 건강영향 평가 결과를 살펴보았다.

미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분의 단기노출에 의한 건강영향 연구에서는 미국과 유럽뿐만 아니라 최근 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분별 건강영향 연구가 이루어진 미국, 유럽 지역 외에

중국, 일본, 한국의 연구 사례를 살펴보았다. 결과적으로 일부 오염물질의 경우 미세먼지($PM_{2.5}$)의 질량농도를 이용하여 추정된 사망의 위험도보다는 구성성분을 이용하여 추정된 사망의 위험도가 더 크게 나타나 미세먼지($PM_{2.5}$)의 질량농도보다는 일부 미세먼지($PM_{2.5}$)를 구성하는 구성성분이 건강의 악영향에 더 주요하게 기여하는 것으로 나타났다.

미세먼지($PM_{2.5}$) 구성성분의 특성 분석에 앞서 최근(2015~2017년)에 서울시의 미세먼지($PM_{2.5}$) 농도의 시계열 변화를 파악하고 공간분포를 살펴본 결과 서울시 북동지역의 미세먼지($PM_{2.5}$) 농도분포는 다른 지역보다 낮은 반면에, 남서지역의 미세먼지($PM_{2.5}$) 농도는 다른 지역보다 높은 패턴을 보였다. 국립환경과학원의 최근 대기오염물질배출량 자료를 활용하여 2015년과 2016년의 배출원별 전국과 서울시의 미세먼지($PM_{2.5}$) 배출 특성을 분석한 결과 전국의 경우 미세먼지($PM_{2.5}$) 배출량은 제조업 연소, 비산먼지, 비도로이동오염원 순으로 높게 나타났으며 서울시는 비산먼지, 비도로이동오염원, 도로이동오염원 순으로 높게 나타나 전국과 서울시의 미세먼지($PM_{2.5}$) 배출원에 차이가 있음을 알 수 있다.

2015년부터 2017년까지 서울시 미세먼지($PM_{2.5}$) 구성성분(탄소성분(OC, EC), 수용성 이온성분(NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+), 금속이온성분(Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+}))의 연도별, 계절별(봄, 여름, 가을, 겨울) 특성을 파악하였으며, 미세먼지($PM_{2.5}$) 구성성분의 상관관계를 분석하였다.

미세먼지($PM_{2.5}$) 대비 비율을 살펴보면 탄소성분의 OC 비율이 평균 26%로 가장 높았으며, 이온성분의 NO_3^- (3년 평균 20.54%)와 SO_4^{2-} (3년 평균 16.57%)의 비율이 다음으로 높게 나타났다. 미세먼지($PM_{2.5}$)와 비교적 높은 상관성(0.5 이상)을 보인 것은 이온성분으로 중 NO_3^- (0.57)와 Cl^- (0.84)였으며 금속이온성분 중 K^+ (0.79), Mg^{2+} (0.65), Na^+ (0.67)가 높은 상관성을 보였다.

본 연구에서는 2015년부터 2017년까지 서울시를 대상으로 미세먼지($PM_{2.5}$)와 미세먼지($PM_{2.5}$) 구성성분(OC, EC, NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+})의 농도 증가로 인한 사망영향을 평가하였다.

본 연구에서는 2015년부터 2017년까지 서울시를 대상으로 미세먼지($PM_{2.5}$)와 미세먼지($PM_{2.5}$)의 구성성분의 사망영향을 정량적으로 평가하였다. 사망영향은 전체연령 사망과 심혈관계 사망영향으로 구분하였고, 연령에 따라서는 전체연령, 65세 이상 연령집단, 65세 미만 연령집단으로 구분하였다.

건강영향 평가 결과, 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가는 전체원인 사망위험과 심혈관계 사망위험을 높였으며, 특히 65세 이상 연령집단에서 사망위험을 통계적으로 유의하게 높였다. 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 중 EC와 OC는 전체 연령과 65세 이상 연령집단에서 전체원인 사망위험을 통계적으로 유의하게 높였다. 특히 미세먼지(PM_{2.5}), EC, OC의 사망위험을 비교한 결과, EC와 OC의 전체원인 사망위험은 미세먼지(PM_{2.5})의 사망위험보다 높은 것으로 나타났다. 따라서 미세먼지(PM_{2.5})로 인한 인체위해를 저감하기 위해서는 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 개선의 양적 관리뿐만 아니라 질적 관리가 병행되어야 한다.

미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분 특성과 건강영향 평가 결과를 토대로 수용체 중심의 미세먼지 관리방안과 관련하여 국외 사례를 살펴보았으며, 현재 미세먼지 관리가 인체위해성에 기반한 관리로 패러다임 전환의 필요성을 제시하였다. 또한 미세먼지와 구성성분의 측정 및 정보제공과 미세먼지와 구성성분의 건강영향 평가 등 인체위해성에 기반한 미세먼지 관리방안의 도입, 인체위해 저감을 위한 배출원 맞춤형 관리대책 추진을 제시하였다.

2. 결론

미세먼지의 효과적이고 체계적인 관리를 위하여 2017년 ‘미세먼지 관리 종합대책’이 수립되고, 2019년 2월 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」이 마련되었으며 2019년 3월 미세먼지로 인한 피해를 사회재난으로 규정하고 국가 차원에서 관리하도록 「재난 및 안전관리 기본법」이 개정되었다. 미세먼지를 관리하기 위한 대책과 법령이 지속적으로 지정되고 있는 시점에서 미세먼지 농도와 배출량을 저감하기 위한 양적 관리뿐만 아니라 인체위해성을 기반한 미세먼지의 질적 관리의 중요성도 부각되고 있다.

본 연구의 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분별 건강영향 평가 결과에서 살펴보았듯이 미세먼지(PM_{2.5})를 구성하는 일부 물질의 경우 건강에 미치는 영향이 미세먼지 질량농도를 사용하여 추정된 영향보다 크게 나타나, 미세먼지(PM_{2.5})의 질량농도의 규제만으로는 미세먼지로 인한 질병 부담의 경감에 충분하지 않을 수도 있다.

국민의 건강을 보다 효과적으로 보호하기 위해서는 미세먼지(PM_{2.5})와 구성성분의 건강영향을 평가하고, 건강과의 연관성이 높은 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분을 파악하여 해당 구성

성분을 배출하는 주요 배출원을 우선적으로 관리하는 미세먼지(PM_{2.5}) 질적 관리도 병행되어야 한다. 이를 위해서는 미세먼지(PM_{2.5})의 배출원의 배출요인, 배출량, 미세먼지 및 구성성분별 농도 특성이 분석되어야 하며, 이를 통한 인구집단의 미세먼지(PM_{2.5}) 노출과 위해도 분석이 필요하다. 위해도 분석 결과는 미세먼지(PM_{2.5}) 배출원 특성에 따른 대책 마련의 과학적 근거가 될 수 있다.

본 연구에서는 서울시의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도 특성과 배출량 특성, 미세먼지(PM_{2.5}) 구성성분별 특성을 파악하였으며, 이에 따른 사망원인별 사망영향을 분석하였다. 지역별로 배출량의 차이가 발생하였고, 구성성분에 따른 사망영향도 차이가 발생하였다. 하지만 본 연구에서는 2차생성 오염물질에 대한 배출량의 고려가 이루어지지 않았으며 향후 1차적인 요인뿐만 아니라 2차생성 오염물질에 의한 배출량과 미세먼지(PM_{2.5})의 구성성분별 건강영향 평가가 이루어져야 할 것이다. 또한 서울시뿐만 아니라 지역별 특성에 맞는 관리를 위해서는 연구대상지역을 확대하여 연구가 진행되어야 한다. 현재 우리나라의 미세먼지 구성성분에 따른 건강영향 연구는 초기단계이지만, 미세먼지(PM_{2.5}) 총질량에 대한 분석뿐만 아니라 구성성분의 특성 파악, 구성성분별 건강영향 평가와 관련한 다각적인 연구, 배출원과 구성성분의 규명 연구 등 다양한 연구를 토대로 국민의 건강한 삶을 확보할 수 있는 미세먼지(PM_{2.5})의 양적 관리 및 질적 관리대책이 마련될 것이다.

| 참고문헌 |

[국내문헌]

- 김선영(2005), “사회경제적 지위에 따른 대기오염이 천식에 미치는 영향”, 서울대학교 박사학위논문. pp.16-17.
- 김용표(2006), “서울의 미세먼지에 의한 대기오염”, 『한국대기환경학회지』, 22(5), pp.535-553.
- 김용표(2017), “초미세먼지 문제 해결을 위한 연구 및 정책 방향”, 『한국대기환경학회지』, 33(3), pp.191-204.
- 김중희 외(2014), “2014년 2월 서울의 고농도 미세먼지 기간 중에 CMAQ-DDM을 이용한 국내외 기여도 분석”, 『한국대기환경학회지』, 32(1), pp.82-99.
- 문광주 외(2011), “2011년도 서울시 대기 중 PM2.5 성분특성 및 발생원 추정에 관한 연구”, 『한국대기환경학회지』, 27(6), pp.711-722.
- 박순애, 신현재(2017), “한국의 초미세먼지(PM2.5)의 영향요인 분석: 풍향을 고려한 계절성 원인을 중심으로”, 『환경정책』, 25(1), pp.227-248.
- 배현주 외(2014), “서울시 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)의 단기노출로 인한 사망영향”, 『한국환경보건학회지』, 40(5), pp.346-354.
- 정영진, 황의조(2015), “PMF 모델을 이용한 경산지역 PM2.5의 오염원 기여도 추정”, 『한국대기환경학회지』, 31(6), pp.508-519.
- 진형아 외(2012), “국내 배출원별 PM2.5 배출량 산정 및 배출 기여도 분석”, 『한국대기환경학회지』, 28(2), pp.211-221.
- 한상희, 김용표(2015), “서울시 대기 중 초미세먼지 (PM2.5) 질량과 화학성분 농도의 장기 변동 추이”, 『한국대기환경학회지』, 31(2), pp.143-156.

[국외문헌]

- Akaike, H.(1973), “Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principal.” B. N. Petrov, and F. Caski, Eds, *Second International Symposium on Information Theory*, pp.267-281.
- Atkinson, R. W. et al.(2015), “Fine Particle Components and Health: A Systematic Review and Meta-Analysis of Epidemiological Time Series Studies of Daily Mortality and Hospital Admissions”, *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 25(2), pp.208-214.
- Basagaña, X. et al.(2015), “Short-Term Effects of Particulate Matter Constituents on Daily Hospitalizations and Mortality in Five South-European Cities: Results from the MED-PARTICLES Project”, *Environment International*, 75, pp.151-158.
- California Air Resources Board: CARB, Office of Environmental Health Hazard Assessment California Environmental Protection Agency: OEHHA(1998), *Proposed Identification of Diesel Exhaust as a Toxic Air Contaminant*.
- California Air Resources Board: CARB(2000), *Risk Reduction Plan to Reduce Particulate Matter Emissions from Diesel-Fueled Engines and Vehicles*.
- California Air Resources Board: CARB(2016), *Short-Lived Climate Pollutant Reduction Strategy*.
- California Air Resources Board: CARB(2019), *2019 Community Recommendations Staff Report*, p.46.
- Chen, C. et al.(2018), “Fine Particle Constituents and Mortality: A Time-Series Study in Beijing, China”, *Environmental Science & Technology*, 52(19), pp.11378-11386.
- Choi, J. K. et al.(2012), “Chemical Characteristics of PM_{2.5} Aerosol in Incheon, Korea”, *Atmospheric Environment*, 60, pp.583-592.
- European Commission(2008), *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and or the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe*, p.L 152/20.

- European Environment Agency: EEA(2018), *Air Quality in Europe — 2018 Report*, pp.26-28.
- European Environmental Bureau: EEB(2017), *Clearing the Air a Critical Guide to the New National Emission Ceilings Directive*, pp.10-11, pp.14-15, p.18, p.30.
- Garcia, E. et al.(2019), “Association of Changes in Air Quality with Incident Asthma in Children in California, 1993-2014”, *JAMA*, 321(19), pp.1906-1915.
- Gauderman, W. J. et al.(2015), “Association of Improved Air Quality with Lung Development in Children”, *The New England Journal of Medicine*, 372, pp.905-913.
- Han, Y. J., T. S. Kim, and H. Kim(2008), “Ionic Constituents and Source Analysis of PM_{2.5} in Three Korean Cities”, *Atmospheric Environment*, 42(19), pp.4735-4746.
- Health Effects Institute: HEI(2013), *Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles*. pp.31-35.
- Heo, J. -B., P. K. Hopke, and S. -M. Yi(2009), “Source Apportionment of PM_{2.5} in Seoul, Korea”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), pp.4957-4971.
- Heo, J. et al.(2014), “Fine Particle Air Pollution and Mortality: Importance of Specific Sources and Chemical Species”, *Epidemiology*, 25(3), pp.379-388.
- Huang, Y. et al.(2014), “Quantification of Global Primary Emissions of PM_{2.5}, PM₁₀, and TSP from Combustion and Industrial Process Sources”, *Environmental Science & Technology*, 48(23), pp.13834-13843.
- Ito, K. et al.(2006), “PM Source Apportionment and Health Effects: 2. An Investigation of Intermethod Variability in Associations between Source-Apportioned Fine Particle Mass and Daily Mortality in Washington, DC”, *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 16(4), pp.300-310.
- Ito, K. et al.(2013), “NPACT Study 3, Time-Series Analysis of Ambient Particulate Matter and Its Components. In: National Particle Component Toxicity (NPACT) Initiative: Integrated Epidemiologic and Toxicologic Studies of the Health Effects of Particulate Matter Components”, *Research Report 177*,

- Boston, MA: Health Effects Institute. pp.95-125.
- Jeong, J. H. et al.(2017), "Comparison of Source Apportionment of PM_{2.5} Using Receptor Models in the Main Hub Port City of East Asia: Busan", *Atmospheric Environment*, 148, pp.115-127.
- Kang, C. M. et al.(2006), "Source Identification and Trends in Concentrations of Gaseous and Fine Particulate Principal Species in Seoul, South Korea", *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(7), pp.911-921.
- Kim, H. S. et al.(2007), "Characteristics of the Major Chemical Constituents of PM_{2.5} and Smog Event in Seoul, Korea in 2003 and 2004", *Atmospheric Environment*, 41(32), pp.6762-6770.
- Krall, J. R. et al.(2013), "Short-Term Exposure to Particulate Matter Constituents and Mortality in a National Study of U.S. Urban Communities", *Environmental Health Perspectives*, 121(10), pp.1148-1153.
- Lee, H. et al.(2008), "Source Identification of PM_{2.5} Particles Measured in Gwangju, Korea", *Atmospheric Research*, 88(3-4), pp.199-211.
- Lee, H. S. and B. -W. Kang(2001), "Chemical Characteristics of Principal PM_{2.5} Species in Chongju, South Korea", *Atmospheric Environment*, 35(4), pp.739-746.
- Lim, J. M. et al.(2010), "Source Apportionment of PM₁₀ at a Small Industrial Area Using Positive Matrix Factorization", *Atmospheric Research*, 95(1), pp.88-100.
- Lin, H. et al.(2016), "Particle Size and Chemical Constituents of Ambient Particulate Pollution Associated with Cardiovascular Mortality in Guangzhou, China", *Environmental Pollution*, 208(Pt B), pp.758-766.
- Mar, T. F. et al.(2006), "PM Source Apportionment and Health Effects. 3. Investigation of Inter-Method Variations in Associations between Estimated Source Contributions of PM_{2.5} and Daily Mortality in Phoenix, AZ", *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 16(4), pp.311-320.

- Oh, M. -S et al.(2011), “Quantitative Source Apportionment of Size-Segregated Particulate Matter at Urbanized Local Site in Korea”, *Aerosol and Air Quality Research*, 11(3), pp.247-264.
- Park, S. S. and Y. J. Kim(2005), “Source Contributions to Fine Particulate Matter in an Urban Atmosphere”, *Chemosphere*, 59(2), pp.217-226.
- Schwartz, J(1994), “Air Pollution and Daily Mortality: A Review and Meta Analysis”, *Environmental Research*, 64(1), pp.36-52.
- South Coast Air Quality Management District: SCAQMD(2008), *MATES III Final Report*, pp.2-10, pp.Appendix VII 6-16.
- South Coast Air Quality Management District: SCAQMD(2015), *MATES IV Final Report*, pp.2-10-2-11.
- The MED-PARTICLES project(2013), *MED-PARTICLES Particles Size and Composition in Mediterranean Countries: Geographical Variability and Short-Term Health Effects*, pp.8-10.
- Ueda, K. et al.(2016), “Associations between Fine Particulate Matter Components and Daily Mortality in Nagoya, Japan”, *Journal of Epidemiology*, 26(5), pp.249-257.
- U.S. Environmental Protection Agency: EPA(2018), *Integrated Science Assessment for Particulate Matter*, pp.11-43, pp.ES-1-ES-22.
- Yang, Y. et al.(2018), “Particulate Matter Components and Health: A Literature Review on Exposure Assessment”, *Journal of Public Health and Emergency*, 2(3), <http://dx.doi.org/10.21037/jphe.2018.03.03>.
- Yi, S. M. and I. Hwang(2014), “Source Identification and Estimation of Source Apportionment for Ambient PM10 in Seoul, Korea”, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 8(3), pp.115-125.

[온라인 자료]

에어코리아, “대기오염물질”, https://www.airkorea.or.kr/web/airMatter?pMENU_NO=130, 검색일: 2019.9.6.

California Air Resources Board, “California’s Diesel Risk Reduction Plan”, <https://ww3.arb.ca.gov/diesel/background.htm>, 검색일: 2019.8.5.

California Air Resources Board, “History”, <https://ww2.arb.ca.gov/about/history>, 검색일: 2019.8.5.

California Air Resources Board, “Programs”, <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs>, 검색일: 2019.8.5.

ECOLEX, “Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe”, <https://www.ecolex.org/details/legislation/directive-200850ec-of-the-european-parliament-and-of-the-council-on-ambient-air-quality-and-cleaner-air-for-europe-lex-faoc080016/>, 검색일: 2019.9.6.

European Commission, “Air Quality - Existing Legislation”, https://ec.europa.eu/environment/air/quality/existing_leg.htm, 검색일: 2019.9.6.

European Environment Agency, “Air Quality Statistics - Expert Viewer”, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-quality-statistics-expert-viewer>, 검색일: 2019.9.6.

EUR-Lex, “Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on National Emission Ceilings for Certain Atmospheric Pollutants”, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0081&from=EN>, 검색일: 2019.9.6.

MED-PARTICLES, “MED-PARTICLES - Particles Size and Composition in Mediterranean Countries: Geographical Variability and Short-Term Health Effects.”, http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3974#BENEF, 검색일: 2019.9.6.

- MED-PARTICLES, “Particles Size and Composition in Mediterranean Countries: Geographical Variability and Short-Term Health Effects”, <http://95.110.213.190/medparticles/index.php?lang=en>, 검색일: 2019.9.6.
- MED-PARTICLES, “The Project”, http://95.110.213.190/medparticles/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=102&lang=en, 검색일: 2019.9.6.
- ResearchGate, “Urban Cities Involved in the MED-PARTICLES”, https://www.researchgate.net/figure/Urban-cities-involved-in-the-MED-PARTICLES-Particles-size-and-composition-in_fig3_311481040, 검색일: 2019.9.6.
- South Coast Air Quality Management District, “Clean Port”, <https://www.aqmd.gov/nav/about/initiatives/clean-port>, 검색일: 2019.8.5.
- South Coast Air Quality Management District, “Health Studies”, <https://www.aqmd.gov/home/air-quality/air-quality-studies/health-studies>, 검색일: 2019.8.5.
- Umweltbundesamt, “Umweltzonen in Deutschland”, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub/umweltzonen-in-deutschland#textpart-1>, 검색일: 2019.9.6.
- U.S. Environmental Protection Agency, “NYU-EPA PM Center”, https://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/index.cfm/fuseaction/display.highlight/abstract/1089, 검색일: 2019.9.6.
- U.S. Environmental Protection Agency, “Process of Reviewing the National Ambient Air Quality Standards”, <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/process-reviewing-national-ambient-air-quality-standards> 검색일: 2019.9.6.

Executive Summary

I. Study Background and Purpose

□ Study Background

- In Korea, the emission of air pollutants has increased since the mid-1990s due to rapid economic development, industrialization, and urbanization.
 - In order to improve air quality and reduce the health burdens caused by air pollution, various environmental policies are implemented at the national level.
- PM_{2.5} has particle sizes smaller than 2.5μm and was reported to cause high risks in human health as it can penetrate deeply into the alveolar.
- There is a difference in health risks according to the source and constituents of PM_{2.5}, so for the management of the human health risk, scientific evidence for the effects on health according to the constituents of PM_{2.5} is needed.

□ Study Purpose

- The characteristics of the constituents of PM_{2.5} were investigated and the health effects of PM_{2.5} constituents were quantitatively evaluated.
- The qualitative management policy for PM_{2.5} was proposed to prepare a prioritized management policy for the PM_{2.5} constituents with high risks on human health.

II. Case Studies on PM_{2.5} constituents and Health Effects of PM_{2.5} constituents

- PM_{2.5} is a composite mixture of more than 50 chemical constituents, and the constituents of PM_{2.5} vary according to the source.
 - PM_{2.5} is composed of various chemicals such as carbonaceous components (EC, OC), trace metal(Al, Ba, Be, Ca²⁺, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg²⁺ etc.), and ions components(NO₃⁻, SO₄²⁻, NH⁺, Cl⁻, Br⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), etc.
 - Major constituents of PM_{2.5} in South Korea were nitrate salt, sulfate salt, ammonium, organic carbon, and elemental carbon, and the ratio of each major constituent vary according to region.
 - Organic carbon was the dominating constituent in Seoul, Incheon and Gwangju, and sulfate salt was the dominating constituents in Daejeon, Busan, and Cheongju.
 - Different methodologies were applied for contribution analysis of PM_{2.5} sources, and distribution of the PM_{2.5} source varied according to seasons or weather conditions.

- Case analysis of studies on health effects of PM_{2.5} constituents in US and Europe
 - The Health Effects Institute in the United States conducted four studies on health effects of PM_{2.5} constituents, including studies on integrated epidemiology and toxicity.
 - Time series analysis showed that the constituents of PM_{2.5} and gaseous pollutants were closely related to health effects along with PM_{2.5} mass concentration.

- The Integrated Science Assessment of the US National Air Quality Standards studied the relationship between PM_{2.5} constituents and mortality, and confirmed a relationship between concentration and ratio of PM_{2.5} constituents and mortality through a comparison with the mass of PM_{2.5}.
- MED-PARTICLES in Europe, with support of the European Commission from 2010 to 2013, identified the characteristics of PM_{2.5} constituents in 14 cities in the Mediterranean countries.

- Study of short-term exposure to PM_{2.5} and its constituents and health
 - Health risk of PM_{2.5} constituents is different based on the region, the cause of death or disease, and season, etc.

III. Characteristics of PM_{2.5} Constituents

- Concentration characteristics of PM_{2.5} in Seoul
 - Between 2015-2017, the annual average PM_{2.5} concentration in Seoul was the highest in 2016 with 26.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - In Seoul, the PM_{2.5} concentration showed that northeastern area had the lowest concentration and southwestern area had the highest concentration.

- PM_{2.5} emission characteristics in Seoul and South Korea according to emission source during 2015 and 2016
 - Total amount of PM_{2.5} emission in South Korea increased from 98,806 tons in 2015 to 100,247 tons in 2016, while the amount of PM_{2.5} emission in Seoul slightly decreased in 2016(2,524 tons), compared to 2015(2,580 tons).

□ Characteristics of PM_{2.5} constituents in Seoul from 2015 to 2017

- A review on the constituents ratio in the PM_{2.5} showed that the ratio of OC, a carbon constituents was the highest with 26% in average, followed by the ratio of NO₃⁻(20.54%) and SO₄²⁻(16.57%).
- Seasonal change of OC was higher in the order of winter(7.89 μ g/m³) > spring(6.36 μ g/m³) > fall(6.62 μ g/m³) > summer(5.13 μ g/m³).
- The constituents showing relatively high correlations (0.5 and higher) with PM_{2.5} were NO₃⁻ and Cl⁻ among the ion constituents and K⁺, Mg²⁺ and Na⁺ among the metal ion constituents.

IV. Assessment the Health Effects of PM_{2.5} Constituents

- The mortality effects of PM_{2.5} and its constituents in Seoul from 2015 to 2017 were assessed.
 - Time series study was applied to quantitatively evaluate the total death and cardiovascular death according to the composition of PM_{2.5}.
 - EC and OC statistically significantly increased the total cause mortality risk in the total age group and the age group over 65 years.
 - The total mortality risk of EC and OC is higher than the mortality risk of PM_{2.5}.
 - Cl⁻ and SO₄²⁻ statistically significantly increased the risk of total death risk and cardiovascular death in the age group of less than 65 years.

V. PM_{2.5} Management Policies focused on Receptor

- Case study of PM_{2.5} management policies based on human health risks
 - The California Air Resources Board was established in southern

California, USA, to regulate vehicle emissions. BC concentrations have declined by nearly 90% since the 1960s, preventing approximately 5,000 premature deaths each year.

- The European Union implemented the National Emission Ceilings Directive in 2001 to improve air quality and manage air environment and enforced the review of the Black Carbon which causes health risks when taking measures to reduce PM_{2.5} emissions.

□ Paradigm shift to PM_{2.5} management based on human health risks

- The management of PM_{2.5} is to reduce the health damage of the people and to create a healthy environment. To achieve these objectives, there should be a paradigm shift first to the management of PM_{2.5} based on human health risks.

□ Implementation of PM_{2.5} management plan based on human health risks

- Measurement of PM_{2.5} constituents and information
 - Although measuring the concentration of PM_{2.5} constituents requires a great deal of resources and professional personnel, PM_{2.5} constituent measurement is essential because the constituents information is a basic factor in the PM_{2.5} management.
 - For items such as constituents that are subdivided and need scientific analysis, there should be separate information provided.
- Health effect of PM_{2.5} and its constituents
 - For qualitative management as well as quantitative management of PM_{2.5}, emission factors, emission amounts, and concentration characteristics of PM_{2.5} emission sources should be analyzed, and we estimate the association between PM_{2.5} and its constituents and health.

- Implementing customized management measures for emission sources to reduce human health risk
 - First, the scope of the management measures needs to be confirmed by considering the contribution of emission source to PM_{2.5} and constituents. Then customized management measures for regional emission sources need to be implemented, considering various limiting factors such as the location of emission sources and emission pollutants.
 - It is necessary to evaluate the contribution of various PM_{2.5} emission sources more accurately by applying a more adequate analysis method for South Korea.

Keywords : PM_{2.5} and its constituents, Mortality, Health risk, PM_{2.5} Management Policy

■ 저자약력

배현주 (연구책임)

서울대학교 환경보건학 박사

한국환경정책·평가연구원 연구위원(현)

hjbae@kei.re.kr

주요 연구실적

- 수용체 중심의 환경정책 활용을 위한 대기오염의 노출위험인구 산정 연구 (2017)
- 지역기반 환경보건정책 지원 방안 연구(II) (2016)

이승민

한국환경정책·평가연구원 부연구위원(현)

leesm@kei.re.kr

정다운

한국환경정책·평가연구원 부연구위원(현)

dwjung@kei.re.kr

오규림

한국환경정책·평가연구원 연구원(현)

gloh@kei.re.kr

김시진

한국환경정책·평가연구원 연구원(현)

sjkim@kei.re.kr

이종태

고려대학교 교수(현)

본 책자는 환경표지 인증을 받은
용지로 인쇄되었습니다.

인체위해 저감방안 마련을 위한 미세먼지 구성성분별 건강영향 연구

Study on the Health Effects of PM2.5 Constituents
for Health Risk Reduction Management Plan

KEI  한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

30147 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 B동(과학·인프라동) 8~11층
TEL. 044-415-7777 FAX. 044-415-7799 <http://www.kei.re.kr>

