



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

연소형 방향제의 연소 입자생성물에 대한
흡입 노출 저감 연구

연세대학교 보건대학원
산업환경보건학과 환경보건전공
김 지 민

연소형 방향제의 연소 입자생성물에 대한
흡입 노출 저감 연구

지도 김 창 수 교수

이 논문을 보건학 석사학위 논문으로 제출함.

2025년 6월

연세대학교 보건대학원

산업환경보건학과 환경보건전공

김 지 민

김지민의 보건학 석사학위 논문을 인준함

심사위원 _____ 김 창 수 _____ 인

심사위원 _____ 임 영 옥 _____ 인

심사위원 _____ 양 지 연 _____ 인

연세대학교 보건대학원

2025년 6월

차 례

표 차 례	iii
그 림 차 례	iv
국 문 요 약	v
I. 서 론	1
II. 연구 방법	4
1. 연구의 틀	4
2. 연구 방법	5
2.1. 제품 및 물질 선정	5
2.2. 제품의 연소생성물 농도 측정	7
2.2.1. 환기 시나리오 설정	7
2.2.2. 시료 측정 조건	9
2.2.3. 미세먼지(PM ₁₀ , PM _{2.5}) 측정 장비	11
2.3. 통계분석	13
2.4. 흡입 노출량 평가	14
2.5. 건강 위해성 평가	15
III. 결 과	16
1. 미세먼지(PM ₁₀ , PM _{2.5}) 농도 변화 분석	16
2. 미세먼지(PM ₁₀ , PM _{2.5})의 흡입 노출평가	24
3. 미세먼지(PM ₁₀ , PM _{2.5})의 건강 위해성 평가	30

IV. 고찰	33
V. 결론	38
참고문헌	39
ABSTRACT	45

표 차 례

표 1. 분석 대상 시료의 제품 분류 및 특성	5
표 2. 분석 대상 물질의 건강 위해성 특징	6
표 3. 연소형 방향제의 환기 시나리오 설정	7
표 4. 연소형 방향제 연소생성물 측정 실험 조건	10
표 5. Testo-400 기기를 활용한 실험 공간 내 온도 및 상대습도 측정 방법	10
표 6. Portable Aerosol Spectrometer 11-D 측정 기기의 사양	12
표 7. Portable Aerosol Spectrometer 11-D 기기를 활용한 측정 방법	12
표 8. PM ₁₀ 및 PM _{2.5} 노출에 따른 조기 사망률 기반 농도-반응계수	15
표 9. 연소형 방향제 제품별 환기 시나리오에 따른 PM ₁₀ 및 PM _{2.5} 의 배경농도	17
표 10. Scenario 1(밀폐)의 제품별 PM ₁₀ 및 PM _{2.5} 의 질량 농도	18
표 11. Scenario 2(밀폐 후 환기(10-min))의 제품별 PM ₁₀ 및 PM _{2.5} 의 질량 농도	19
표 12. Scenario 2(밀폐 후 환기(Full-time))의 제품별 PM ₁₀ 및 PM _{2.5} 의 질량 농도	20
표 13. Scenario 3(자연환기)의 제품별 PM ₁₀ 및 PM _{2.5} 의 질량 농도	21
표 14. PM ₁₀ 의 환기 시나리오별 공기 중 농도(C _a) 및 흡입 노출 농도(C _{Inh})	26
표 15. PM _{2.5} 의 환기 시나리오별 공기 중 농도(C _a) 및 흡입 노출 농도(C _{Inh})	27
표 16. PM ₁₀ 및 PM _{2.5} 의 환기 시나리오별 Risk Value 산정	31

그림 차례

그림 1. 연구의 틀	4
그림 2. 연소형 방향제의 환기 시나리오 설정	8
그림 3. Portable Aerosol Spectrometer 11-D 측정 장비	11
그림 4. 제품별 환기 시나리오에 따른 PM_{10} 의 질량 농도 변화	22
그림 5. 제품별 환기 시나리오에 따른 $PM_{2.5}$ 의 질량 농도 변화	23
그림 6. PM_{10} 의 환기 시나리오별 농도 변화 및 노출시간	28
그림 7. $PM_{2.5}$ 의 환기 시나리오별 농도 변화 및 노출시간	29
그림 8. Scenario 1 대비 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 Relative risk reduction	32

국 문 요 약

본 연구는 연소형 방향제 사용 시 연소 과정에서 발생하는 입자상 연소생성물인 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)의 건강 위해 영향을 평가하고자, 질량 농도 변화와 흡입 노출 농도를 환기 조건에 따라 분석하였다. 시중에서 유통되는 인센스 스틱형 제품 2종을 시료로 선정하였으며, $3m^3$ 규모의 밀폐된 실험 공간에서 1m 높이에 Portable Aerosol Spectrometer 11-D 장비를 설치하여 실시간 6초 간격으로 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 의 질량 농도를 측정하였다.

연소형 방향제는 연소 직후, 모든 환기 조건에서 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 질량 농도가 급격히 상승하였다. 특히 연소 전 과정에서 외부 공기를 차단한 밀폐 조건에서는 초기의 고농도 상태가 상대적으로 길게 유지되어, 흡입 노출 농도 및 건강 위해도가 가장 높게 나타났다. 반면, 연소 전 과정에서 자연환기를 실시한 조건에서는 연소 시작 후 30분 이내에 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도가 배경농도 수준으로 저감되었으며, 밀폐 조건 대비 약 70%의 위해도 저감률을 보였다. 또한, 연소 중 밀폐 및 연소 종료 후 창문을 개방하여 자연환기를 실시간 조건에서는 연소 종료 후 최소 25분만에 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 농도가 배경농도 수준으로 저감되었으며, 밀폐 조건 대비 약 42~45%의 위해도 저감률을 보였다. 따라서, 연소형 방향제 사용 시 연소 전 과정에서 자연환기를 실시하거나, 연소 종료 직후 최소 25분간 지속적으로 환기를 병행하는 것은 미세먼지 노출을 감소시켜 건강 위해 영향을 최소화할 수 있다.

본 연구는 연소형 방향제 사용 시 발생하는 입자상 오염물질인 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)의 농도 변화와 건강 위해성을 정량적으로 분석하고, 환기 조건에 따른 흡입 노출 저감 효과를 과학적 근거에 기반하여 평가하였다. 연소형 방향제의 안전한 사용을 위한 환기 방안 마련과 향후 건강영향평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

핵심어: 연소형 방향제, 연소생성물, 미세먼지, 흡입 노출, 위해성 평가

I. 서론

생활화학제품은 가정, 사무실, 다중이용시설 등 일상적인 생활공간에서 사용되는 화학제품으로 세정제, 방향제, 탈취제, 접착제 등과 같이 다양한 용도로 구성되어 있으며, 일상생활 속에서 빈번하게 사용되어 사람과 환경에 화학물질의 노출을 유발할 수 있다.

현대 사회에서는 실내 활동의 비중이 점차 증가하고 있으며, 실내공기질은 개인의 건강 및 삶의 질에 중요한 영향을 미친다. 실내공기질이 저하될 경우, 호흡기 및 심혈관계, 신경계 질환 등 다양한 건강 문제가 유발될 수 있으며, 만성폐쇄성폐질환(COPD), 천식 등 만성 질환의 발병 위험이 증가한다(Tran et al., 2021).

연소형 방향제는 제품 연소를 통해 향기 성분을 공기 중에 확산시키는 생활화학제품으로, 심신 안정 및 명상 등의 목적으로 널리 사용된다. 그러나 디퓨저나 스프레이 등 비연소형 제품과 달리, 연소형 방향제는 연소 과정에서 미세먼지, 휘발성유기화합물(VOCs)과 같은 입자상 및 가스상 연소생성물을 발생시키고, 이는 실내공기질 저하의 주요 원인으로 보고되고 있다(Li et al., 2024; Tirler et al., 2015; WHO, 2024).

연소생성물은 산화 스트레스 및 염증 반응을 유도하여 기관지 상피세포 손상을 초래하고, 장기적으로는 호흡기 질환, 심혈관계 질환, 암 등 만성 질환 발생과도 밀접한 관련이 있다(Hoshino et al., 2025; Yamamoto et al., 2021). 특히, 환기가 제한된 밀폐 환경에서는 연소생성물이 고농도로 축적되어 급성 및 만성적 건강 위험을 초래할 수 있음이 보고되었다(Lung et al., 2003).

연소형 방향제 사용 시 발생하는 휘발성 유기화합물(VOCs)과 같은 가스상 오염물질에 대한 위해성 평가는 비교적 활발히 이루어져 왔으나, 미세먼지에 대한 노출 및 건강 위해성 평가는 상대적으로 부족한 실정이다(Lung et al., 2003). 특히 BTEXs(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌) 등 일부 VOCs는 발암 가능성이 있는 물질로 제품 연소 시 실내 VOCs 농도가 증가한다고 보고된 바 있

으며, 일반적인 사용 조건에서는 급성 및 만성 위해 우려가 낮은 수준으로 평가되었으나 적절한 환기가 핵심적인 관리 요소로 강조되었다(Hoshino et al., 2025; 한국환경산업기술원, 2023). 반면, 미세먼지에 관한 기존 연구는 연소 과정에서 발생하는 질량 농도 측정에 주로 초점을 맞추고 있으며, 흡입 노출 농도를 반영한 정량적 건강 위해 평가 연구는 아직 미비한 실정이다(Hoshino et al., 2025; Tirler et al., 2015). 연소형 방향제 사용 시 연소 직후 미세먼지 농도가 급격히 상승하고 WHO 실내공기질 가이드라인을 초과하는 사례가 다수 보고되어 이에 대한 정량적 위해성 분석이 필요하다(Gilio et al., 2025; Višić et al., 2018; WHO, 2024).

미세먼지는 입자 크기, 폐 침투성, 체내 반응성 측면에서 실내 노출의 주요 건강 영향 지표로 간주된다. PM_{10} 은 지름 $10\mu m$ 이하, $PM_{2.5}$ 는 지름 $2.5\mu m$ 이하의 미세입자로 입경이 작을수록 폐포 깊숙이 침투하여 전신 염증 반응을 유도할 수 있다(WHO, 2024). 이는 심혈관계 및 대사성 질환, 호흡기계 염증 반응과 면역계 자극에도 밀접하게 연관되며, 천식 악화 및 만성기관지염, 폐렴 등 다양한 건강 문제를 유발할 수 있다(Hoshino et al., 2025; Yamamoto et al., 2021). 또한, 미세먼지는 후각신경 또는 혈류를 통한 중추신경계 침투로 신경계 손상과 태아 발달 장애를 유발할 수 있으며, 취약계층에서 더 큰 영향을 미치기 때문에 노출 저감이 필수적이다(Sudhakaran et al., 2024; Morakinyo et al., 2016).

실내에서 발생한 오염물질은 환기 방식에 따라 농도 변화가 크게 달라질 수 있다. 환기 방식은 미세먼지와 같은 실내 오염물질 농도를 저감시키는 데 있어 중요한 변수로 보고되었다(Višić et al., 2018). 그러나, 연소형 방향제 사용 시 발생하는 미세먼지가 환기 방식에 따라 건강 영향에 미치는 정량적 평가 연구는 부족한 실정이다. 이에 따라, 적절한 환기 시나리오를 설정하고 실시간 농도 변화 및 흡입 노출 농도를 분석하는 연구는 향후 건강영향평가 및 환경위해관리 측면에서 실질적인 과학적 근거를 제공할 수 있다.

본 연구는 연소형 방향제 연소 시 발생하는 입자상 연소생성물인 미세먼지의 입경별 질량 농도를 정량적으로 측정하고, 환기 시나리오에 따른 농도 변화 특성을 비교·분석하며, 흡입 노출 농도 및 건강 위해성을 평가하고자 한다. 이를 통해 연소형 방향제 사용 시 흡입 노출 저감 방안과 안전한 사용환경 조성에 기여하고자 한다.

첫째, 환기 시나리오를 설정하여 연소형 방향제 사용 시 발생하는 미세먼지의 질량 농도를 정량적으로 측정한다.

둘째, PM_{10} , $PM_{2.5}$ 의 흡입 노출 농도를 산정하고 환기 시나리오에 따른 흡입 노출량 평가를 수행한다.

셋째, PM_{10} , $PM_{2.5}$ 의 건강 위해성을 평가하여 환기 시나리오에 따른 흡입 노출 저감을 위한 과학적 근거를 마련한다.

Ⅱ. 연구방법

1. 연구의 틀

본 연구는 연소형 방향제의 연소 과정에서 발생하는 입자상 연소생성물인 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)의 질량 농도 변화와 공기 중 농도 수준을 파악하고, 환기 시나리오에 따른 흡입 노출 농도를 고려하여 건강 위해 영향을 평가하고자 한다. 환기 시나리오를 설정하여 환기 방식별 발생하는 미세먼지의 질량 농도를 측정하고, 흡입 노출 농도 및 조기사망 위험도와 상대 위험도 저감률을 산정하여 흡입 노출 저감을 위한 건강 위해성을 정량적으로 비교 평가하였다.

본 연구의 틀은 다음과 같다.



그림 1. 연구의 틀

2. 연구 방법

2.1. 제품 및 물질 선정

본 연구에서는 온·오프라인 시중에서 판매되는 2종류의 인센스 스틱을 분석 시료로 선정하였다(표 1). 인센스 스틱은 일반적으로 심신 안정, 명상 등 목적으로 실내 환경에서 사용되는 연소형 방향제로, 연소 시 다량의 연소생성물이 배출되어 본 연구의 분석 대상에 적합하였다. 소비자 접근성과 유통 빈도가 높은 제품군을 우선 고려하였으며, 주요 원료 구성성분이 유사한 제품으로 선정하여 성분 차이에 따른 영향을 최소화하였다.

모든 시료는 외부 환경에 의한 물리·화학적 영향을 최소화하고자 차광된 조건에서 밀봉 상태로 보관하였으며, 분석 전까지 상온(20~25℃) 및 건조한 환경을 유지하였다.

표 1. 분석 대상 시료의 제품 분류 및 특성

Category	Type	Purpose	Formulation	Products
생활화학제품	방향제	일반용 (실내공간용)	연소형	Incense A (인도)
				Incense B (인도)

본 연구는 연소형 방향제 사용으로 인해 실내에서 발생하는 미세먼지가 입경별로 인체 건강에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 PM₁₀(지름 10 μ m 이하), PM_{2.5}(지름 2.5 μ m 이하)를 주요 분석 대상 물질로 선정하였다. 연소 과정에서 발생하는 미세먼지의 입자 크기별 농도 분포 특성을 파악하고, 환기 조건이 물질별 농도에 미치는 영향을 평가하기 위함이다. 특히, PM_{2.5}는 초미세먼지로 입경이 매우 작아 폐포 깊숙이 침투할 수 있으며, 체내 염증 반응을 유발하고 심혈관계 및 호흡기계 질환의 악화와 조기사망의 위험을 높이는 것으로 알려져 있다(표 2).

표 2. 분석 대상 물질의 건강 위해성 특징

Pollutant	Major Health Effects of the Substance	Reference
PM ₁₀	천식, 기관지염, 심혈관계 질환	US EPA, WHO
PM _{2.5}	폐렴, 심혈관계 질환, 조기사망 위험	US EPA, WHO

PM₁₀: particulate matter less than 10 μ m in diameter, PM_{2.5}: particulate matter less than 2.5 μ m in diameter, US EPA: United States Environmental Protection Agency, WHO: World Health Organization

2.2. 제품의 연소생성물 농도 측정

2.2.1. 환기 시나리오 설정

환기 조건별 농도 변화의 차이를 분석하기 위해 세 가지 환기 시나리오를 설정하였다(표 3). 환기 시나리오 설정은 연소 시작 및 종료 후 환기 방식에 따라 실시간 미세먼지의 농도 변화를 비교하고 정량적으로 평가하기 위해 설정되었다(그림 2).

표 3. 연소형 방향제의 환기 시나리오 설정

Ventilation Scenarios		
Scenario 1	밀폐	연소 전 과정에서 외부 공기 차단 및 밀폐 환경
Scenario 2	밀폐 후 환기	연소 중 밀폐 및 연소 종료 후 창문 개방하여 자연환기
Scenario 3	자연환기	연소 전 과정에서 창문 개방하여 자연환기

Scenario 1(밀폐)은 연소 시작부터 종료 이후까지 창문이나 환기구 등 외부 공기의 유입이 차단된 밀폐 상태에서 실험이 수행되었다. 밀폐 상태에서의 환기율은 ASTM E741 표준 방법에 따라 0.0027회/min으로 측정되었다(ASTM, 2006). Scenario 2(밀폐 후 환기)는 연소 시작 시점부터 연소 후반부까지 10분간 밀폐 상태를 유지한 후, 연소생성물이 가장 많이 배출되는 연소 종료 시점에 10분간 일시적으로 창문을 개방하여 외부 공기를 유입시키고, 이후 다시 밀폐 상태에서 측정되었다. 환기 후 10분 경과 시점부터의 농도는 Lung et al.(2003)의 환기 조건에서 미세먼지 농도가 환기율 및 시간 경과에 따라 지속적으로 감소한다고 보고된 바 있으며, $k = 0.06 \text{ min}^{-1}$ 의 Decay rate 값을 사용하여 환기 구간에서의 농도를 계산하였다. Scenario 3(자연환기)는 연소 시작과 동시에 창문을 개방하여 모든 연소 과정에서 외부 공기의 지속적인 유입이 가능한 조건에서 실험이 수행되었다.

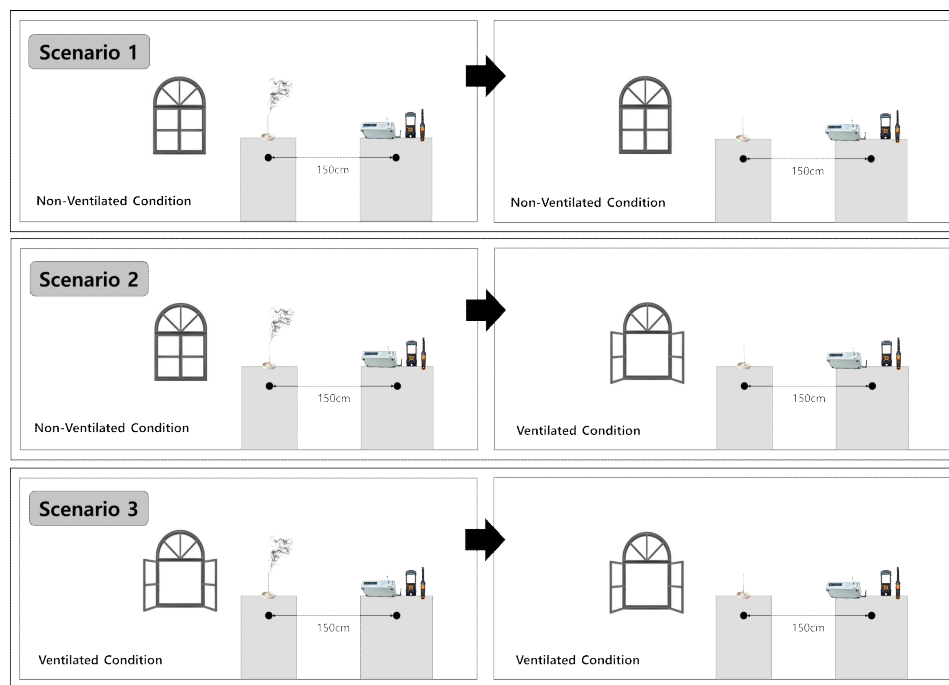


그림 2. 연소형 방향제의 환기 시나리오 설정

2.2.2. 시료 측정 조건

시간 경과에 따른 미세먼지의 농도 변화를 정량적으로 분석하고자 3m³ 규모의 밀폐된 실험 공간에서 수행되었다(표 4).

환기 시나리오별 배경농도 및 연소 전 과정의 농도 변화를 포괄적으로 관찰하고자 1시간 30분 동안 실시간으로 측정하였다. 연소형 방향제 연소 전 약 10분간 배경농도를 측정하였으며, 측정의 신뢰도와 재현성을 확보하고자 동일한 조건에서 2회 반복 수행되었다. 배경농도는 실험 공간의 기본적인 실내공기질 상태를 확인하고, 연소로 인한 오염물질의 농도 증가량을 정량적으로 분석하기 위한 기준값으로 활용되었다. 연소형 방향제 각 제품의 환기 시나리오에 따른 입경별 미세먼지의 정량적 질량 농도는 연소 시작 시점부터 종료 후 농도가 배경농도 수준으로 회복될 때까지 총 80분간 측정하였다.

미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 농도 변화에 영향을 미칠 수 있는 환경적 요인을 고려하여 실험 공간 내 온도 및 상대습도는 Testo-400 장비를 활용해 실시간으로 측정하였다(표 5).

표 4. 연소형 방향제 연소생성물 측정 실험 조건

Experimental Condition	
공간 크기	3 m ³
밀폐 상태의 환기율	0.0027 회/min (ASTM, 2006)
온도	19±2 °C
상대 습도	23±1 %
측정 시간	1시간 30분

표 5. Testo-400 기기를 활용한 실험 공간 내 온도 및 상대습도 측정 방법

Measurement Method of Testo-400	
측정 항목	온도(°C), 상대습도(%RH)
측정 주기	6초 간격 실시간 모니터링
측정 방법	실험 공간 내 1 m 높이에 기기를 배치하여 연속 측정
측정 방식	비분산 적외선(NDIR, Non-Dispersive Infrared) 방식
온도 측정 범위	-20 ~ +60 °C
습도 측정 범위	0 ~ 100 %RH

2.2.3. 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 측정 장비

미세먼지 측정은 Portable Aerosol Spectrometer 11-D(Grimm Aerosol Technik, Germany) 측정 장비를 활용하여 연소형 방향제 사용 시 발생하는 미세먼지의 입자 농도를 실시간으로 분석하였다.

Portable Aerosol Spectrometer 11-D 장비는 광산란 방식에 기반하여 0.25 μm 에서 35 μm 범위의 입자 크기로 구분해 측정할 수 있다. 미세먼지의 질량 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 변환 기능을 제공하며, 최대 3,000,000 particles/L의 농도까지 정밀한 측정이 가능하다(GAT, 2023)(표 6).

측정은 실험 공간 내 지면으로부터 1m 높이에 장비를 설치한 후, 6초 간격의 실시간 연속 모니터링 방식으로 수행되었다(표 7).



그림 3. Portable Aerosol Spectrometer 11-D 측정 장비

표 6. Portable Aerosol Spectrometer 11-D 측정 기기의 사양

Details of Portable Aerosol Spectrometer 11-D	
장비명	Portable Aerosol Spectrometer 11-D
제조사	Grimm Aerosol Technik, Germany
측정 원리	광산란 방식 (Light Scattering Method)
입자 크기 범위	0.25 μm - 35 μm
최대 측정 농도	3,000,000 particles/L

표 7. Portable Aerosol Spectrometer 11-D 기기를 활용한 측정 방법

Measurement Method of Portable Aerosol Spectrometer 11-D	
측정 항목	PM ₁₀ , PM _{2.5} (단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
측정 주기	6초 간격 실시간 모니터링
측정 방법	실험 공간 내 1 m 높이에 기기를 배치하여 연속 측정

PM₁₀: particulate matter less than 10 μm in diameter, PM_{2.5}: particulate matter less than 2.5 μm in diameter

2.3. 통계분석

연소형 방향제 제품 간 연소생성물의 농도 변화 및 그 차이를 분석하기 위해 통계분석을 수행하였다. 통계분석은 IBM SPSS Statistics(Version 27, IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 활용하였으며, 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 농도의 시간적 변화 및 환기 시나리오에 따른 통계적 차이를 정량적으로 분석하였다.

제품 간 농도의 차이를 검정하기 위해 독립표본 t-검정(Independent Samples t-test)을 수행하였으며, 모든 통계분석은 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 실시하였다. p -value가 0.05 미만인 경우, 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 간주하였다.

2.4. 흡입 노출량 평가

본 연구에는 흡입 노출량 평가를 위해 연소형 방향제 사용으로 인한 미세먼지의 흡입 노출 농도(C_{Inh} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 「생활화학제품 위해성평가의 대상 및 방법 등에 관한 규정」(화학물질안전원 고시 제2024-27호)의 ‘별표 5’에 제시된 수식을 사용하여 산출하였다(수식 (1)).

$$C_{Inh}(\mu\text{g}/\text{m}^3) = C_a \times t \times n / 24 \dots\dots\dots (1)$$

흡입 노출 농도(C_{Inh} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 산정하기 위해 실내 공기 중 물질의 농도(C_a , $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 사용빈도(n , 회/day), 노출시간(t , h/회)의 변수를 적용하였다.

실내 공기 중 물질의 농도(C_a , $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 시간에 따른 농도 변화를 반영하여 실험에서 측정된 시점별 농도와 노출시간을 기반으로 산정하였다(수식 (2)).

$$C_a(\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{C_1 \cdot t_1 + C_2 \cdot t_2 + \dots + C_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \dots\dots\dots (2)$$

노출계수 중 사용빈도 및 제품 사용 개수는 한국환경산업기술원(2023)의 선행 연구 보고서에서 수행한 인센스 스틱형 제형의 사용 행태 설문조사 결과를 기반으로 도출된 75분위수 값인 8.6 회/month와 2개/회(거실, 침실, 욕실 기준)를 적용하였다.

2.5. 건강 위해성 평가

연소형 방향제의 연소 시 발생하는 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 에 대한 건강 위해성 평가는 조기사망을 지표로 한 정량적 위해도 산정을 통해 수행되었다. 조기사망 위해도는 흡입 노출 농도(C_{Inh} , $\mu g/m^3$)와 단위 농도 증가에 따른 조기사망률 기반 농도-반응계수(CR , Concentration-Response coefficient, per $\mu g/m^3$)를 적용하여 산정하였다(수식 (3)).

$$Risk\ Value = CR(\mu g/m^3)^{-1} \times C_{Inh}(\mu g/m^3). \dots\dots\dots (3)$$

조기사망률 기반 농도-반응계수(CR , per $\mu g/m^3$)는 Bea.(2014)의 연구에서 서울시를 대상으로 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도가 $10\ \mu g/m^3$ 증가할 때의 조기사망률을 기반으로 산정된 값을 적용하였다. PM_{10} 은 $CR = 0.0004$ per $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 는 $CR = 0.0009$ per $\mu g/m^3$ 가 적용되었다(표 8).

표 8. PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 노출에 따른 조기 사망률 기반 농도-반응계수

Pollutant	Age range	CR for mortality		95% CI (per $10\ \mu g/m^3$)	Reference
		($10\ \mu g/m^3$)	(per $\mu g/m^3$)		
PM_{10}	All ages	0.44%	0.0004	0.25, 0.63	(Bae, 2014)
$PM_{2.5}$		0.95%	0.0009	0.57, 1.34	

CR : concentration-response coefficient, CI: confidence interval

III. 결 과

1. 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 농도 변화 분석

미세먼지의 배경농도는 PM₁₀, PM_{2.5} 모두 일정한 농도 수준을 유지하였으며, 이는 실험 전 실내 환경 조건이 충분히 안정화되었고 외부 요인의 영향이 효과적으로 차단되었음을 나타낸다. 배경농도는 제품 간 평균값을 기준으로 Scenario 1(밀폐)에서 PM₁₀은 $16.9 \pm 2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 $11.9 \pm 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, Scenario 2(밀폐 후 환기)에서 PM₁₀은 $16.6 \pm 2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 $11.6 \pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Scenario 3(자연환기)에서는 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 각각 $15.3 \pm 2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $11.0 \pm 0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다(표 9).

연소 시작 직후 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도는 급격히 증가한 후 점차 감소하는 유사한 경향을 보였다(그림 4, 그림 5). Incense A와 Incense B 제품 간 농도 변화는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 확인되었다($p > 0.05$). 반면, PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 질량 농도는 환기 시나리오에 따라 뚜렷한 차이를 보였으며 결과는 표 10~13에 제시하였다. Scenario 1(밀폐)에서는 PM₁₀의 농도가 최대 $84.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 평균 $48.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 최대 $68.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 평균 $44.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 전반적으로 가장 높은 농도 상승과 함께 비교적 느리고 완만한 저감 양상을 보였다. Scenario 2(밀폐 후 환기(10-min))에서는 PM₁₀은 평균 $43.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 $38.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 초기 밀폐 상태에서 Scenario 1과 유사한 고농도가 관찰되었으나, 10분간의 환기 개입 이후 일시적으로 유의미하게 감소하였다. Scenario 2(밀폐 후 환기(Full-time))에서는 PM₁₀은 평균 $41.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 $37.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 환기 개입 이후 농도는 빠르게 감소한 뒤 저감 효과가 지속적으로 유지되었다. Scenario 3(자연환기)에서는 PM₁₀은 평균 $25.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 $21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모든 시나리오 중 가장 낮은 농도 수준과 뚜렷한 저감 효과를 보였다.

표 9. 연소형 방향제 제품별 환기 시나리오에 따른 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 배경농도

Scenario	Products	Mean \pm SD (Min, Max)	
		PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1. 밀폐	Mean of Incense A and B	16.9 \pm 2.6 (13.0, 21.1)	11.9 \pm 0.6 (10.3, 13.4)
	Incense A	17.0 \pm 2.8 (12.1, 21.9)	12.0 \pm 1.1 (9.2, 14.0)
	Incense B	16.8 \pm 2.6 (13.1, 20.6)	11.8 \pm 0.7 (10.2, 13.2)
2. 밀폐 후 환기	Mean of Incense A and B	16.6 \pm 2.6 (13.1, 20.4)	11.6 \pm 0.5 (10.5, 12.8)
	Incense A	17.1 \pm 2.7 (13.2, 21.3)	12.0 \pm 0.7 (10.5, 13.5)
	Incense B	16.1 \pm 2.6 (12.4, 20.4)	11.1 \pm 0.6 (9.6, 12.7)
3. 자연환기	Mean of Incense A and B	15.3 \pm 2.9 (11.7, 19.5)	11.0 \pm 0.4 (10.0, 12.2)
	Incense A	15.1 \pm 2.4 (12.0, 19.1)	11.1 \pm 0.6 (10.0, 12.6)
	Incense B	15.6 \pm 3.5 (10.9, 20.2)	10.9 \pm 0.5 (9.3, 11.9)

SD: standard deviation, Min: minimum, Max: maximum.

표 10. Scenario 1(밀폐)의 제품별 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 질량 농도

Scenario 1		Mean \pm SD	P_{25}	P_{50}	P_{75}	t	p
Pollutant	Products	(Min, Max)($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
PM ₁₀	Mean of Incense A and B	48.9 \pm 14.4 (25.0, 84.5)	37.3	48.0	57.7	-	-
	Incense A	47.4 \pm 14.2 (24.1, 86.4)	35.8	45.8	56.1	-1.6	0.11
	Incense B	50.4 \pm 15.0 (23.9, 87.5)	38.6	48.9	59.6		
	Mean of Incense A and B	44.0 \pm 12.3 (24.0, 68.5)	33.0	42.9	54.2	-	-
PM _{2.5}	Incense A	42.5 \pm 12.3 (23.3, 70.1)	31.3	40.5	52.8	-1.7	0.10
	Incense B	45.4 \pm 12.8 (22.6, 76.7)	34.6	45.2	57.0		
	Mean of Incense A and B	44.0 \pm 12.3 (24.0, 68.5)	33.0	42.9	54.2	-	-

SD: standard deviation, Min: minimum, Max: maximum, P_{25} : the 25th percentile, P_{50} : the 50th percentile, P_{75} : the 75th percentile, t : test statistic from independent t-test, p : p -value indicating statistical significance of differences between Incense A and B in each scenario.

* p -value < 0.05

표 11. Scenario 2(밀폐 후 환기(10-min))의 제품별 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 질량 농도

Scenario 1		Mean \pm SD (Min, Max)($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	P_{25}	P_{50}	P_{75}	t	p
Pollutant	Products						
PM ₁₀	Mean of Incense A and B	43.6 \pm 16.6 (20.7, 85.9)	29.9	39.1	55.2	-	-
	Incense A	43.2 \pm 16.3 (19.8, 87.4)	30.0	39.1	54.6	0.5	0.61
	Incense B	43.9 \pm 17.3 (17.9, 91.2)	29.7	39.2	55.2		
PM _{2.5}	Mean of Incense A and B	38.6 \pm 15.1 (19.0, 69.7)	26.1	33.7	53.3	-	-
	Incense A	38.3 \pm 14.8 (18.3, 72.4)	26.3	32.3	51.5	0.6	0.58
	Incense B	38.9 \pm 15.8 (15.6, 74.3)	25.7	35.0	55.7		

SD: standard deviation, Min: minimum, Max: maximum, P_{25} : the 25th percentile, P_{50} : the 50th percentile, P_{75} : the 75th percentile, t : test statistic from independent t-test, p : p -value indicating statistical significance of differences between Incense A and B in each scenario.

* p -value < 0.05

표 12. Scenario 2(밀폐 후 환기(Full-time)의 제품별 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 질량 농도

Scenario 1		Mean \pm SD	P_{25}	P_{50}	P_{75}	t	p
Pollutant	Products	(Min, Max)($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
PM ₁₀	Mean of Incense A and B	41.8 \pm 18.2 (17.3, 85.9)	26.8	38.5	55.2	-	-
	Incense A	40.9 \pm 18.3 (16.6, 87.4)	25.8	37.7	54.6	0.5	0.61
	Incense B	42.7 \pm 18.4 (18.0, 91.2)	27.7	39.1	55.2		
PM _{2.5}	Mean of Incense A and B	37.4 \pm 16.3 (15.0, 69.7)	23.5	33.7	53.3	-	-
	Incense A	37.1 \pm 15.9 (15.7, 72.4)	24.4	32.2	51.5	0.6	0.58
	Incense B	37.7 \pm 17.0 (14.4, 74.3)	22.5	35.0	55.7		

SD: standard deviation, Min: minimum, Max: maximum, P_{25} : the 25th percentile, P_{50} : the 50th percentile, P_{75} : the 75th percentile, t : test statistic from independent t-test, p : p -value indicating statistical significance of differences between Incense A and B in each scenario.

* p -value < 0.05

표 13. Scenario 3(자연환기)의 제품별 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 질량 농도

Scenario 1		Mean \pm SD	P_{25}	P_{50}	P_{75}	t	p
Pollutant	Products	(Min, Max)($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
PM ₁₀	Mean of Incense A and B	25.6 \pm 9.0 (12.8, 55.2)	18.8	23.3	30.4	-	-
	Incense A	24.2 \pm 9.1 (12.7, 48.8)	17.4	21.3	30.2	-2.6*	0.01
	Incense B	26.9 \pm 10.2 (11.8, 67.0)	20.1	24.4	32.4		
	Mean of Incense A and B	21.3 \pm 7.7 (10.8, 46.6)	14.8	19.4	26.5	-	-
PM _{2.5}	Incense A	20.1 \pm 8.1 (10.3, 41.1)	13.5	17.0	27.6	-1.3	0.21
	Incense B	22.5 \pm 8.8 (10.3, 60.7)	15.9	21.3	25.9		
	Mean of Incense A and B	21.3 \pm 7.7 (10.8, 46.6)	14.8	19.4	26.5	-	-

SD: standard deviation, Min: minimum, Max: maximum, P_{25} : the 25th percentile, P_{50} : the 50th percentile, P_{75} : the 75th percentile, t : test statistic from independent t-test, p : p -value indicating statistical significance of differences between Incense A and B in each scenario.

* p -value < 0.05

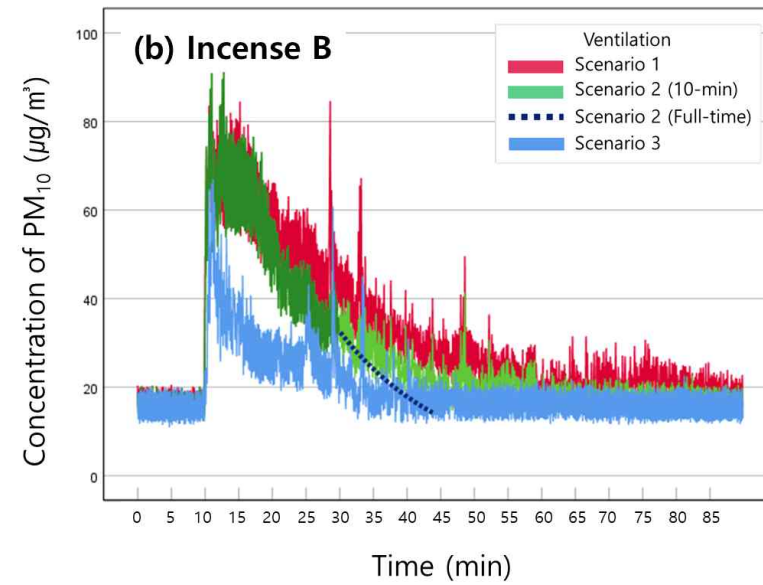
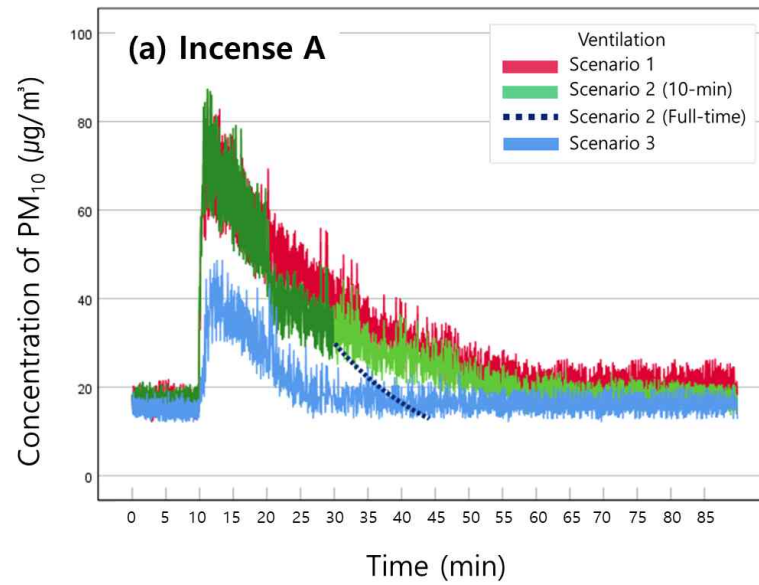


그림 4. 제품별 환기 시나리오에 따른 PM_{10} 의 질량 농도 변화

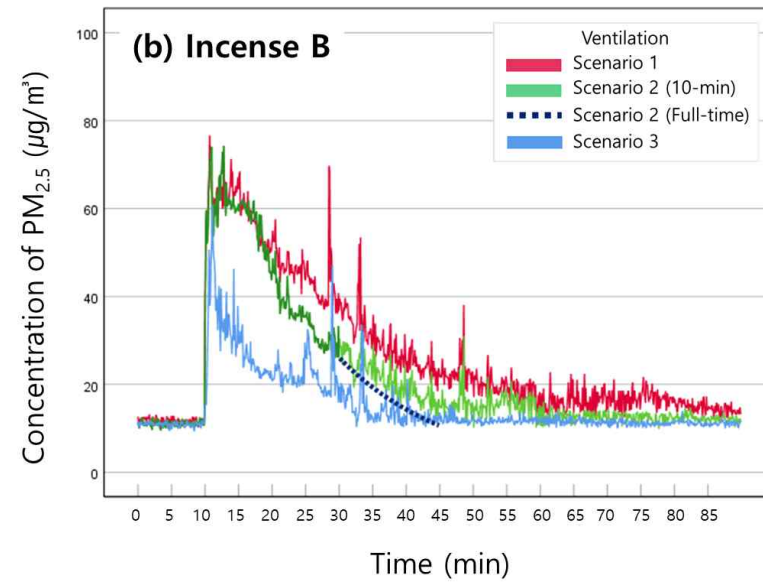
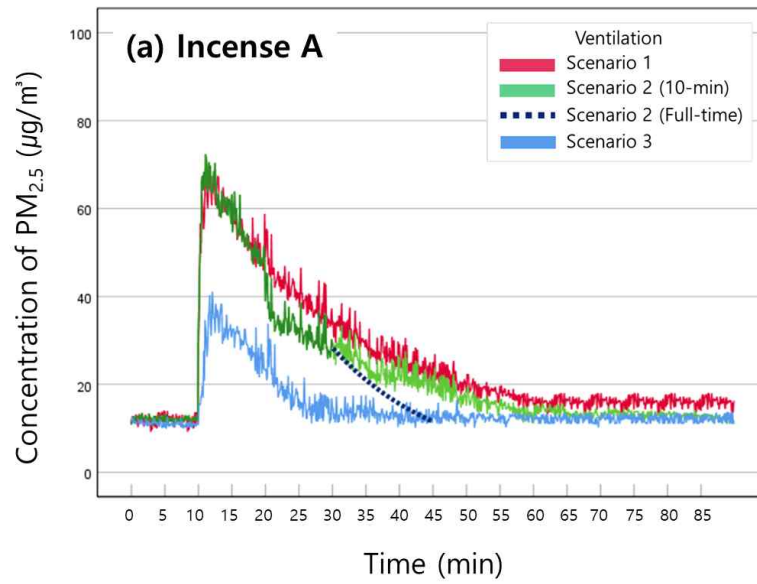


그림 5. 제품별 환기 시나리오에 따른 $PM_{2.5}$ 의 질량 농도 변화

2. 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 흡입 노출평가

연소형 방향제 사용 시 발생하는 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 실내 공기 중 농도(C_a)를 적용하여 흡입 노출 농도(C_{Inh})를 산정하였다(표 14, 표 15). 노출 시간은 연소 직후 급격히 증가한 농도가 다시 배경농도 수준으로 감소할 때까지의 구간을 기준으로 환기 시나리오별 노출 간격은 0.1분 단위이다. 노출시간은 Scenario 1(밀폐) 70분, Scenario 2(밀폐 후 환기(10-min))는 60분, Scenario 2(밀폐 후 환기(Full-time))는 35분, Scenario 3(자연환기)은 30분으로 관찰되었다(그림 6, 그림 7). Scenario 1(밀폐)에서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 C_{Inh} 값은 각각 0.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모든 시나리오 중 가장 높은 수준을 나타냈다. 이는 밀폐된 공간에서는 연소 이후에도 미세먼지가 효과적으로 제거되지 않아 흡입 가능성이 장기간 유지될 수 있음을 시사한다. PM₁₀의 C_a 값은 34.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 29.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 연소 직후 급격히 증가한 농도가 장시간에 걸쳐 점진적으로 감소하면서 잔류하는 경향을 보였다. Scenario 2(밀폐 후 환기(10-min))에서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 C_{Inh} 값은 각각 0.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 Scenario 1에 비해 낮은 수준이었으나 비교적 높은 흡입 노출 농도가 유지되었다. 이는 환기 개시 직후 농도가 급격히 감소하였음에도 불구하고, 10분 이내의 단기적 환기만으로는 미세먼지 농도 저감에 한계가 있음을 시사한다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 C_a 값은 각각 32.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 27.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. Scenario 2(밀폐 후 환기(Full-time))에서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 C_{Inh} 값은 각각 0.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 10분 환기 조건보다 낮은 농도 수준을 나타냈다. 연소 직후 농도는 급격히 상승하였으나, 환기 시작과 동시에 빠르게 감소하는 경향을 보였으며 지속적 환기가 흡입 노출 저감에 효과적임을 시사한다. 이에 본 연구에서는 배경농도 수준에 도달하기까지 약 25분 이상의 환기 시간이 필요한 것으로 확인되었다. PM₁₀의 C_a 값은 37.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 33.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 밀폐 상태에서의 초기 고농도 노출로 인해 전체 평균 노출 농도는 상대적으로 높게 산정되었다. Scenario 3(자연환기)에서

PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 C_{Inh} 값은 각각 0.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모든 시나리오 중 가장 낮게 나타났다. 이는 연소 전 과정에서 즉각적이고 지속적인 환기가 미세먼지의 실내 잔류 농도뿐만 아니라 흡입 노출 농도 저감에 효과적으로 기여했음을 시사한다. C_a 값은 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 각각 25.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 21.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 짧은 시간 내에 농도가 급격히 감소하고 빠르게 안정화되는 경향을 보였다.

표 14. PM₁₀의 환기 시나리오별 공기 중 농도(C_a) 및 흡입 노출 농도(C_{inh}) 산정

Scenario		Exposure coefficient					C_{Inh} of PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
		Exposure time to C_a		C_a of PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exposure duration (h/use)	Frequency of use (use/day)	
		Unit time (min)	Total time (min)				
밀폐		0.1	70	34.4	1.2	0.28	0.93
밀폐 후 환기	10-min	0.1	60	32.0	1.0	0.28	0.74
	Full-time	0.1	35	37.9	0.6	0.28	0.51
자연환기		0.1	30	25.6	0.5	0.28	0.30

C_a : time-weighted indoor air concentration of the substance,
 C_{inh} : Inhalation Exposure Concentration.

표 15. PM_{2.5}의 환기 시나리오별 공기 중 농도(C_a) 및 흡입 노출 농도(C_{Inh}) 산정

Scenario		Exposure coefficient					C_{Inh} of PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
		Exposure time to C_a		C_a of PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Exposure duration (h/use)	Frequency of use (use/day)	
		Unit time (min)	Total time (min)				
밀폐		0.1	70	29.4	1.2	0.28	0.79
밀폐 후 환기	10-min	0.1	60	27.0	1.0	0.28	0.63
	Full-time	0.1	35	33.9	0.6	0.28	0.46
자연환기		0.1	30	21.3	0.5	0.28	0.25

C_a : time-weighted indoor air concentration of the substance,
 C_{Inh} : Inhalation Exposure Concentration.

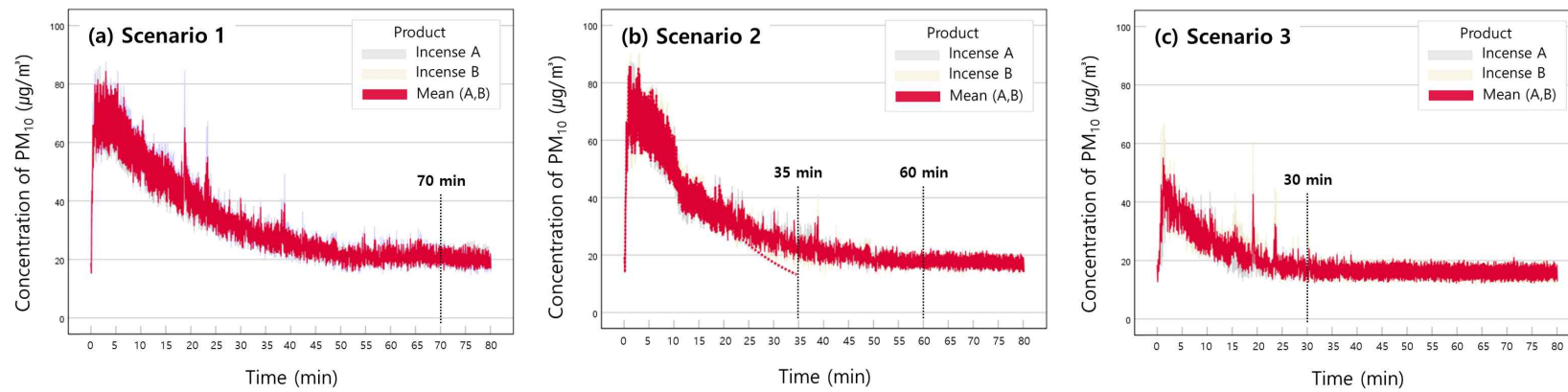


그림 6. PM_{10} 의 환기 시나리오별 농도 변화 및 노출시간

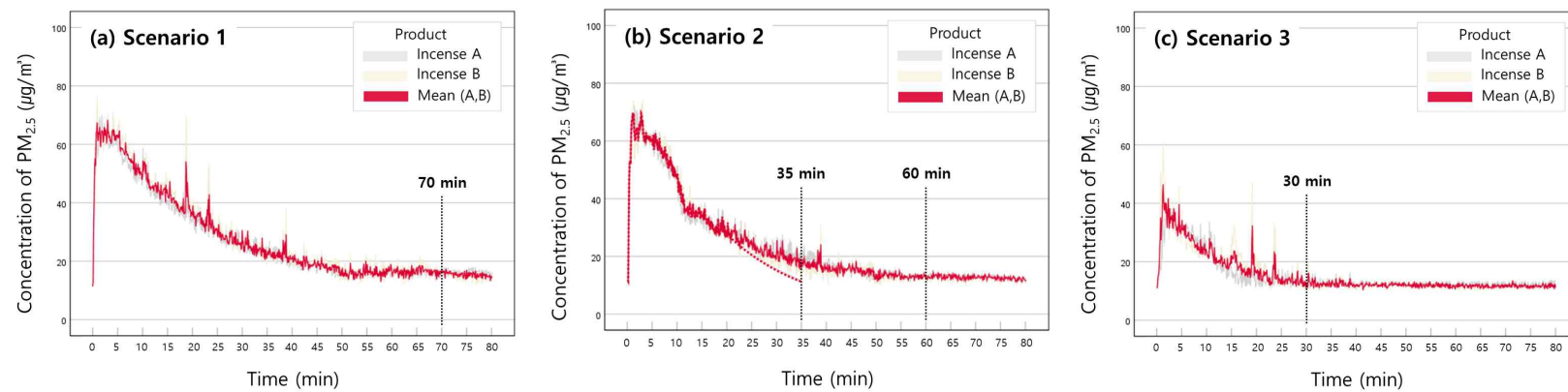


그림 7. $PM_{2.5}$ 의 환기 시나리오별 농도 변화 및 노출시간

3. 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 건강 위해성 평가

본 연구에서는 연소형 방향제 사용 시 발생하는 입자상 연소생성물인 PM₁₀ 및 PM_{2.5}에 대한 단기 노출로 인한 조기사망률 증가를 기반으로 위험도(Risk Value) 및 상대 위험도 저감률(RRR)을 산정하여 건강 위해성을 정량적으로 평가하였다(표 16, 그림 8).

Scenario 1(밀폐)에서 PM₁₀의 위험도 값은 3.7×10^{-4} 로 인구 10,000명당 약 3.7명의 조기사망 발생 가능성을 시사한다. PM_{2.5}의 경우 7.1×10^{-4} 로 PM₁₀ 대비 약 1.9배 높은 위해 수준이며 10,000명당 약 7.1명의 조기사망 가능성이 있다. Scenario 2(밀폐 후 환기(10-min))에서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 위험도 값은 각각 3.0×10^{-4} , 5.6×10^{-4} 로 감소하였으며, 이는 Scenario 1 대비 각각 20.2%, 21.3% 낮은 수준으로 일정 수준의 환기가 위험도 감소에 기여함을 보여준다. Scenario 2(밀폐 후 환기(Full-time))에서는 PM₁₀의 위험도가 2.0×10^{-4} , PM_{2.5}는 4.1×10^{-4} 로 감소하여 각각 45.0%, 42.4%의 저감 효과를 보였다. Scenario 3(자연환기)의 경우 PM₁₀의 위험도는 1.2×10^{-4} , PM_{2.5}는 2.2×10^{-4} 로 Scenario 1 대비 각각 68.2%, 69.2%의 위험도 저감률을 나타냈다.

이에 본 연구에서는 단기 노출로 인한 조기사망 위험이 환기 방식에 따라 실질적으로 달라질 수 있음을 시사하며, 지속적이고 충분한 환기는 건강 위해를 효과적으로 저감할 수 있음을 보여준다.

표 16. PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 환기 시나리오별 Risk Value 산정

Pollutant	Scenario	C_{Inh} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CR ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$)	Risk Value	RRR
PM ₁₀	밀폐	0.93	0.0004	3.7×10^{-4}	-
	10-min	0.74		3.0×10^{-4}	20.2%
	밀폐 후 환기				
	Full-time	0.51		2.0×10^{-4}	45.0%
	자연환기	0.30		1.2×10^{-4}	68.2%
PM _{2.5}	밀폐	0.79	0.0009	7.1×10^{-4}	-
	10-min	0.63		5.6×10^{-4}	21.3%
	밀폐 후 환기				
	Full-time	0.46		4.1×10^{-4}	42.4%
	자연환기	0.25		2.2×10^{-4}	69.2%

C_{Inh} : inhalation Exposure Concentration,
 CR : concentration-response coefficient,
 RRR: relative risk reduction compared to scenario 1.

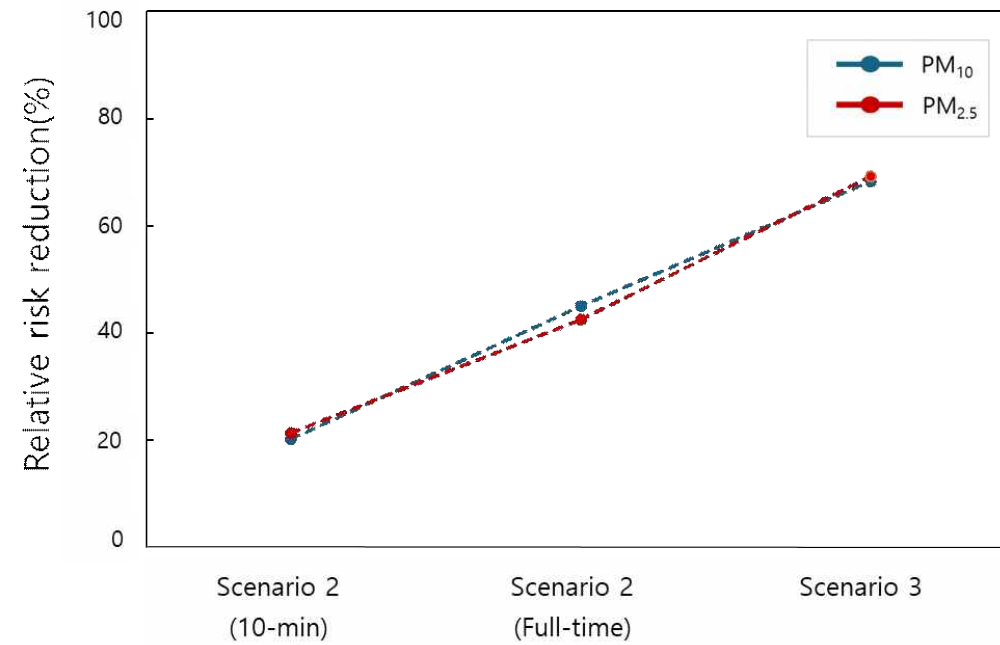


그림 8. Scenario 1 대비 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 Relative risk reduction

IV. 고 찰

본 연구는 연소형 방향제 사용 시 발생하는 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)의 농도 변화와 흡입 노출 농도를 환기 시나리오에 따라 분석하고 건강 위해성을 평가하였다. 실험 결과, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 는 제품 연소 직후 급격한 농도 상승이 관찰되었다. 특히, 연소 전 과정에서 환기가 이루어지지 않은 밀폐된 환경에서 연소형 방향제 사용 시, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도가 가장 높게 유지되었으며 농도 저감 속도도 가장 느리게 나타났다. 이는 환기가 부족할 경우 연소 과정에서 생성된 입자상 오염물질이 실내 공기 중에 장시간 잔류함을 시사하며(Lee et al., 2004), 단기간 노출만으로도 고농도로 흡입할 가능성을 의미한다. Manoukian et al.(2013)은 연소형 방향제 사용 시 실내 미세먼지 농도가 배경 농도 대비 20~30배 이상 증가할 수 있다고 보고하였다. Gilio et al.(2025)의 연구에서도 연소형 방향제 연소 시 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도가 각각 $203 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $171 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 상승하여 세계보건기구(WHO)의 권고기준을 초과하는 것으로 나타났다. 본 연구에서도 이와 유사한 수준의 농도 변화가 관찰되었으며, 밀폐된 환경에서 장시간 연소형 방향제 사용은 잠재적인 건강 위해를 초래할 수 있음을 시사한다.

환기 여부에 따라 연소형 방향제 사용 중 발생하는 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 저감에 유의미한 차이가 관찰되었다. 연소 전 과정에서 외부 공기를 차단하고 환기가 이루어지지 않은 경우에 비해 연소 시작 시점부터 자연환기를 병행한 조건에서는 미세먼지 농도가 가장 효과적으로 저감되었다. 연소 중에는 밀폐 상태를 유지하다가 연소 종료 직후 환기를 실시한 경우, 향 성분의 잔류로 인해 배경농도 수준까지의 저감은 다소 시간이 소요되었으나, 환기 개시 직후 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도는 급격히 감소하는 경향을 보였다. Manoukian et al.(2013)은 연소형 방향제 연소 과정에서 발생한 오염물질이 환기와 표면 흡착 등의 저감 메커니즘을 통해 단기간 내 배경농도 수준으로 감소할 수 있음

을 보고하였으며, See et al.(2011)은 밀폐된 실내에서는 미세입자가 효과적으로 저감되지 않음을 시사하며 환기의 중요성을 강조하였다. 또한, Li et al.(2022)와 Wang et al.(2006)은 연소형 방향제 사용 시 환기를 실시한 경우, 잔류하는 미세먼지의 제거 효율이 크게 향상된다고 보고하였다. 본 연구 결과에서도 연소 중 지속적인 환기와 종료 직후의 즉각적인 환기를 병행할 때 실내 공기 중 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도를 가장 효과적으로 저감할 수 있음을 보여준다.

연소형 방향제 사용 시 연소 과정에서 발생하는 미세먼지는 다양한 유해 유기화합물을 포함하고 있다. 연소형 방향제에서 생성된 $PM_{2.5}$ 내 테르페놀류 화합물이 포함되어 있으며, 특히 알레르기 유발 가능성이 높은 제라니올을 비롯해 D-리모넨, 리날룰, 아니실 알코올 등이 다량 검출된 바 있다(Kuo et al., 2017). 이러한 향료 유기화합물들은 피부 접촉 시 높은 감작성으로 인해 접촉성 피부염과 같은 피부 이상 반응을 유발할 수 있다. 또한, 흡입 시 호흡기 점막을 자극하여 염증 반응을 일으키거나 천식 증상을 악화시킬 수 있는 것으로 보고되었다(Kuo et al., 2015). 제라니올은 향료 성분으로 주로 사용되지만, 독성과 알레르기 유발 잠재성이 높아 반복적으로 고농도 노출 시 호흡기 알레르기를 유발할 수 있음이 보고되었다(Kuo et al., 2017). 이에 따라 연소형 방향제 사용 시 발생하는 미세먼지에는 표면에 부착된 유기화합물로 인한 알레르기성과 독성으로 인해 복합적인 건강 위험을 초래할 수 있다.

연소형 방향제는 제품에 따라 입자상 연소생성물의 배출량에 차이가 발생할 수 있다. 제품 내 연소성분은 대체로 천연 목재 물질로 구성되어 있지만, 배출량 차이는 각 제품의 원료 배합과 조성 차이에 기인할 수 있다. Hoshino et al.(2025)의 연구에 따르면 일본의 가정 및 사찰에서 사용되는 연소형 방향제 제품을 각각 분석한 결과, 최대 100배 이상 향료 함량에 차이가 나타남을 보고하였다. 이에 배출되는 $PM_{2.5}$ 의 농도 또한 현저히 달라질 수 있음을 시사한

다. Jetter et al.(2002)의 연구에서도 연소형 방향제의 연소 효율이 낮을 경우, 완전 연소가 충분히 이루어지지 않아 입자상 및 가스상 연소생성물의 배출량이 크게 증가할 수 있음을 보고하였다. Li et al.(2022)의 연구에서는 연소형 방향제 제품의 종류에 따라 다환방향족탄화수소(PAHs) 등의 배출계수와 흡입 위해도는 수 배 이상 차이가 나타날 수 있으며, 제품 원료의 구성 및 첨가제의 사용 여부와 제조 공정상의 차이에 기인할 수 있다고 보고하였다. 이에 따라 제품 간 입자상 연소생성물의 배출량 차이는 제품의 연소 효율성, 첨가제의 유무, 제조 공정 등 복합적 요인의 영향을 받을 수 있다.

미세먼지의 입자 크기에 따라 호흡기 내 침착 부위가 다르고 건강 영향에도 차이가 나타난다. 지름 $10\mu\text{m}$ 이상의 입자는 주로 비강, 인두 등 상부 호흡기에서 걸러져 국소적인 자극 정도에 그칠 수 있다. $2.5\sim 10\mu\text{m}$ 범위의 입자는 기관지에 침착될 수 있으나, 점막의 섬모운동과 폐포 내 대식세포 작용으로 인해 대부분 제거되는 것으로 보고된다(Dean E., 2020). 반면, 지름 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)는 기관지 및 폐포 등 호흡기 하부까지 깊숙이 도달하여 침착될 수 있으며, 입자 크기가 작을수록 표면적 대비 부피 비율이 커지기 때문에 입자 표면에 부착된 다양한 유해물질이 체내로 운반될 가능성이 높다(Dean E., 2020). 본 연구에서도 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 밀폐된 실내 환경에서 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였으며, 연소 과정에서 발생한 $\text{PM}_{2.5}$ 의 건강 위험성은 PM_{10} 에 비해 더 높은 수준으로 평가되었다. 연소 과정에서 발생한 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)는 폐포 깊숙이 침투하여 인체의 방어기전으로부터 효과적으로 제거되지 않으며, 장기간 고농도에 노출될 경우 염증 반응 및 산화 스트레스를 유발하여 호흡기 및 심혈관 질환의 위험을 증가시킬 수 있다(Pope et al., 2006). 그러나, 지름 $1\mu\text{m}$ 이하의 극초미세먼지(PM_1)의 농도 분포 특성과 장기 노출에 따른 구체적인 건강 영향 평가 연구는 아직 부족한 실정이다. Hu et al.(2018)의 연구에 따르면 PM_1 은 단위 질량당 조기사망 기여율 측면에서 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 보다 더 높은 것으로 나타났다. PM_1 은 폐포를 지나 혈류까지 침투할

가능성이 높으며, 독성물질의 주요 운반체 역할을 수행한다고 보고된 바 있다 (Dean E., 2020; Kuo et al., 2015). 이는 PM_{10} 이 더 작은 입경 특성으로 인해 폐 깊숙한 부위까지 침투하고, 입자 표면에 부착된 독성물질을 인체 내부로 운반하는 매개체 역할을 함으로써 건강 영향을 더욱 심화시킬 수 있음을 시사한다. 따라서, 향후 연구에서는 지름 $1\mu m$ 이하의 극초미세먼지(PM_{10})에 대한 농도 분포 특성과 독성 작용 기전을 정밀하게 분석하고, 건강 위해성과 장기 노출로 인한 영향을 평가하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구의 제한점은 다음과 같다. 첫째, 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 중심의 입자상 연소생성물을 정량 분석하였으나, 각 미세입자의 화학적 조성 및 독성학적 특성에 대한 구체적인 정보가 충분히 확보되어 있지 않아 건강 위해성에 대한 심층적 분석에는 한계가 있다. 둘째, 제한된 측정 시료 수와 반복 측정 횟수로 인해 실험 결과의 신뢰도와 일관된 경향을 도출하기에는 표본 대표성이 부족하다. 다양한 제품군을 대상으로 충분한 반복 실험을 수행하여 제품 특성에 따른 차이를 정량적으로 규명할 필요가 있다. 셋째, 본 연구는 유럽연합(EU)의 연소형 방향제 연소생성물에 대한 BSI 공인 시험법에서 권장하는 $1m^3$ 표준 챔버가 아닌 $3m^3$ 규모의 작은 방 크기의 실험 공간에서 수행하였다. 이는 제품의 연소 과정에서 발생한 가스상 및 입자상 연소생성물이 더 크게 희석되었을 가능성이 있다. 국제 공인 시험법에서 권장하는 $1m^3$ 표준 챔버를 적용하여 실험을 진행함으로써 공간적 희석 효과를 보완할 필요가 있다. 넷째, 본 연구는 일반적인 주거 환경 또는 사무 공간, 종교 시설 등 다양한 실내 환경을 모두 반영하기에는 어려움이 존재한다. 실제 생활 공간은 구조적 특성, 외부 기류, 실내 활동량 등 다양한 요인이 실내공기질에 영향을 미치므로 결과에 차이가 발생할 수 있다. 특히, 실내 공기의 유동 특성과 외부 기류의 개입은 연소생성물의 체류 시간 및 농도 변화에 영향을 미치므로 실생활에 가까운 실내 환경 조건을 반영한 분석이 필요하다. 다섯째, 본 연구에서 수행한 건강 위해성 평가는 제품 사용 시 단기 노출을 기반으로 한 추정값에 한정되었으며, 장

기적인 누적 노출에 따른 영향은 반영되지 않았다. 반복적인 노출 환경에서 체내 유해물질의 축적 가능성과 면역계에 미치는 장기적 영향에 대한 충분한 평가가 이루어지지 않았으며, 만성 노출에 따른 건강 영향을 정량적으로 파악하기 위한 장기 노출 기반의 정밀 분석이 필요하다. 마지막으로, 본 연구에서는 자연환기 개입 여부에 따른 흡입 위해도 저감 효과를 중심으로 분석하였으며, 공기청정기와 같은 기계적 환기 시스템의 사용 효과는 고려되지 않았다. 자연환기뿐만 아니라 기계적 환기 시스템의 다양한 유형 및 성능에 따른 유해 연소생성물의 저감 효과를 비교·분석할 필요가 있다.

본 연구는 연소형 방향제 사용 시 연소 과정에서 발생하는 입자상 연소생성물(PM_{10} , $PM_{2.5}$)에 대해 환기 조건에 따른 질량 농도 변화 및 흡입 노출 농도를 분석하고, 건강 위해 영향을 평가하였다. 향후 연구에서는 다양한 제품군과 실제 생활 환경을 반영하여 다각적 접근을 통해 건강 위해성을 종합적으로 평가할 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구는 실내 환경에서 연소형 방향제 사용 시 발생하는 입자상 연소생성물(PM_{10} , $PM_{2.5}$)의 흡입 노출 특성 및 건강 위해성을 세 가지 환기 조건(밀폐, 밀폐 후 환기, 자연환기)에 따라 정량적으로 평가하였다.

연소형 방향제는 연소 직후 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 질량 농도가 급격히 상승하였으며, 환기 조건에 따라 농도 수준과 저감 속도에 뚜렷한 차이를 보였다. 특히, 연소 전 과정에서 외부 공기를 차단한 밀폐 환경에서는 WHO 실내공기질 권고 기준을 초과하는 고농도 상태가 비교적 오랜 시간 지속되었고, 농도 저감 속도도 가장 느려 흡입 노출 농도 및 건강 위해도가 가장 높게 나타났다. 반면, 연소 전 과정에서 자연환기를 실시한 조건에서는 미세먼지 농도가 상대적으로 낮게 유지되었으며, 연소 시작 후 30분 이내에 배경농도 수준으로 감소하였다. 이에 따라 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 건강 위해도는 연소 전 과정에서 밀폐된 조건에 비해 각각 68.2%, 69.2% 감소하는 효과를 나타냈다. 또한, 연소 중 밀폐 상태를 유지하다가 연소 종료 직후 창문을 개방하여 자연환기를 실시한 경우, 미세먼지 농도가 연소 종료 25분 후에 배경농도 수준으로 감소하였다. 이때 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 건강 위해도는 밀폐 조건 대비 각각 45.0%, 42.4% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 밀폐된 환경에서 장시간 연소형 방향제 사용은 잠재적인 건강 위해를 유발할 가능성이 있으며, 연소형 방향제 사용 시 연소 전 과정 또는 연소 종료 후 최소 25분간 환기를 실시하는 것이 건강 위해를 최소화할 수 있음을 시사한다.

향후 연구에서는 연소형 방향제의 제품군별 노출 특성 및 실생활 환경을 고려한 다각적 접근 방식과 장기적 누적 노출로 인한 만성 건강 영향에 관한 추가적인 연구가 진행되어야 한다. 본 연구 결과는 환기 조건에 따른 흡입 노출 저감 효과를 과학적 근거에 기반해 평가함으로써 향후 건강영향평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

- 화학물질안전원. 생활화학제품 위해성평가의 대상 및 방법 등에 관한 규정. 제2024-27호
- 환경부. 안전확인대상생활화학제품 지정 및 안전·표시기준. 제2024-139호
- 한국환경산업기술원. 2023년도 생활화학제품 위해성평가 및 안전기준 개선연구, 2023.
- 질병관리청. 미세먼지 건강영향, 2021.
- 국립환경과학원. 한국인의 노출계수 핸드북, 2019.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). Indoor air pollution: An Introduction for health professionals, 2024.
- World Health Organization (WHO). Household air pollution, 2024.
- GRIMM Aerosol Technik. Portable Aerosol Spectrometer 11-D Manual. DURAG Group, 2023.
- Testo SE & Co. KGaA. Testo-400 Manual. Testo, 2023.
- World Health Organization (WHO). WHO Global Air Quality Guidelines, 2021.
- ASTM International. ASTM E741: Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2006.
- Hoshino S, Noro K, Wang Q, Amagai T. Fragrance, volatile organic compound, and particulate matter emissions from incense burning: Observations and risk assessments for household rooms and temples in Japan. Atmospheric Environment 2025;342:120930.

- Gilio AD, Palmisani J, Pastore L, Nisi M, Piscitelli P, Miani A, Gennaro GD. Indoor air quality (IAQ) evaluation in a naturally ventilated church: Key pollutants concentrations determined by incense burning practice over liturgical celebrations. *Atmospheric Environment* 2025;350:121143.
- Jeong K, Lee Y, Park M, Lee M, Jo J, Koh S, Lim Y, Shin D, Kim C. Association between respiratory tract deposited dose of size-segregated PM and FeNO based on individual exposure assessment for Korean children. *Science of the Total Environment* 2024;957:177795.
- Jiyeon Y, Shervin H, Taeyeon K, Jeongwon P, Minji P, Wonseok H, Dongjun P, Youngwook L. Risk assessment and estimation of controlling safe distance for exposure to particulate matter from outdoor secondhand tobacco smoke. *Air Quality, Atmosphere & Health* 2024;17:1587-1588.
- Jeongwon P. A study on the Improvement of Inhalation Exposure Algorithm for Reactive Sterilization Products. 2024.
- Sudhakaran G, Ramamurthy K, Dhaareshwar VN, Rajagopal R, Alfarhan A, Arockiaraj J. Neurotoxic and developmental effects of scented incense stick smoke: Network toxicology and zebrafish model study. *Toxicol Lett* 2024;402:15-26.
- Li J, Wang Y, Hu J, Liu Y. Diffusion characteristics of indoor pollutants from incense sticks combustion in Tibetan Plateau buildings: An experimental study. *Journal of Building Engineering* 2024;94:110035.
- Yin H, Zhai X, Ning Y, Li Z, Ma Z, Wang X, Li A. Online monitoring of PM_{2.5} and CO₂ in residential buildings under different ventilation modes in Xi'an city. *Building and Environment* 2022;207:108453.
- Li J, Xu H, Song D, Wang Z, Zhang B, Feng R, Gu Y, Jiang Z, Ji X, Liu S, Ho SS, Qu L, Sun F. Emission characteristics and assessment of potential health risks on PM_{2.5}-bound organics from incense burning. *Atmospheric Pollution Research* 2022;13(3):101326.

- Pond Z, Saha P, Coleman C, Presto A, Robinson A, Arden Pope C. Mortality risk and long-term exposure to ultrafine particles and primary fine particle components in a national U.S. Cohort. *Environment International* 2022;167:107439.
- Yamamoto N, Kan-o K, Tatsuta M, Ishii Y, Ogawa T, Shinozaki S, Fukuyama S, Nakanishi Y, Matsumoto K. Incense smoke-induced oxidative stress disrupts tight junctions and bronchial epithelial barrier integrity and induces airway hyperresponsiveness in mouse lungs. *Sci Rep* 2021;11(1):7222.
- Tran LK, Morawska L, Quang TN, Jayaratne RE, Hue NT, Dat MV, Phi TH, Thai PK. The impact of incense burning on indoor PM_{2.5} concentrations in residential houses in Hanoi, Vietnam. *Building and Environment* 2021;205:108228.
- Guo SE, Chi MC, Lin CM, Yang TM. Contributions of burning incense on indoor air pollution levels and on the health status of patients with chronic obstructive pulmonary disease. *PeerJ* 2020;8:e9768.
- Dean E. The health effects of ultrafine particles. *Experimental & Molecular Medicine* 2020;52:311-317.
- Yongmi P, Laeun K, Wonsik C. Comparison of Transit User' s Inhalation Rates of PM_{2.5} between Three Transportation Types (Walk, Bus, Subway) in Spring and Summer in Urban Areas of Busan, Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 2019;35(5):577-592.
- Višić B, Kranjc E, Pirker L, Bačnik U, Tavčar G, Škapin S, Remškar M. Incense powder and particle emission characteristics during and after burning incense in an unventilated room setting. *Air Quality, Atmosphere & Health* 2018;11(6):649-663.
- Hu K, Guo Y, Hu D, Du R, Yang X, Zhong J, Fei F, Chen F, Chen G, Zhao Q, Yang J, Zhang Y, Qian Chen Q, Ye T, Li S, Qi J. Mortality burden attributable to PM₁

- in Zhejiang province, China. *Environment International* 2018;121:515-522.
- Zhang J, Sun B, McDonagh AM, Zhao Y, Kretschmer K, Guo X, Wang G. A multi-functional gel co-polymer bridging liquid electrolyte and solid cathode nanoparticles: An efficient route to Li-O₂ batteries with improved performance. *Energy Storage Materials* 2017;7:1-7.
- Kuo SC, Tsai YI. Emission characteristics of allergenic terpenols in PM_{2.5} released from incense burning and the effect of light on the emissions. *Science of the Total Environment* 2017;584-585:495-504.
- Jilla A, Kura B. Particulate Matter and Carbon Monoxide Emission Factors from Incense Burning. *Environment Pollution and Climate Change* 2017;1(4):140.
- Wolkoff P, Nielsen GD. Effects by inhalation of abundant fragrances in indoor air - An overview. *Environ Int* 2017;101:96-107.
- Morakinyo OM, Mokgobu MI, Mukhola MS, Hunter RP. Health Outcomes of Exposure to Biological and Chemical Components of Inhalable and Respirable Particulate Matter. *Int J Environ Res Public Health* 2016;13(6):592.
- Lui KH, Bandowe BA, Ho SS, Chuang HC, Cao JJ, Chuang KJ, Lee SC, Hu D, Ho KF. Characterization of chemical components and bioreactivity of fine particulate matter (PM_{2.5}) during incense burning. *Environ Pollut* 2016;213:524-532.
- Bootdee S, Chantara S, Prapamontol T. Determination of PM_{2.5} and polycyclic aromatic hydrocarbons from incense burning emission at shrine for health risk assessment. *Atmospheric Pollution Research* 2016;7(4):680-689.
- Kuo SC, Tsai YI, Sopajaree K. Emission identification and health risk potential of allergy-causing fragrant substances in PM_{2.5} from incense burning. *Building and Environment* 2015;87:23-33.

- Tirler W, Settimo G. Incense, sparklers and cigarettes are significant contributors to indoor benzene and particle levels. *Ann Ist Super Sanità* 2015;51(1):28-33.
- Hyun-joo B. Effects of Short-term Exposure to PM_{10} and $PM_{2.5}$ on Mortality in Seoul. *J Environ Health Sci*, 2014; 40(5): 346-354.
- Manoukian A, Quivet E, Temime-Roussel B, Nicolas M, Maupetit F, Wortham H. Emission characteristics of air pollutants from incense and candle burning in indoor atmospheres. *Environmental Science and Pollution Research* 2013;20: 4659-4670.
- See SW, Balasubramanian R. Characterization of fine particle emissions from incense burning. *Building and Environment* 2011;46(5):1074-1080.
- Ji X, Bihan OL, Ramalho O, Mandin C, D' Anna B, Martinon L, Nicolas M, Galloo JC. Characterization of particles emitted by incense burning in an experimental house. *Indoor Air* 2010;20(2):147-158.
- Nazaroff WW. Inhalation intake fraction of pollutants from episodic indoor emissions. *Building and Environment* 2008;43(3):269-277.
- Billet S, Garcon G, Dagher Z, Verdin A, Ledoux F, Cazier F, Courcot D, Aboukais A, Shirali P. Ambient particulate matter ($PM_{2.5}$): physicochemical characterization and metabolic activation of the organic fraction in human lung epithelial cells (A549). *Environ Res* 2007;105(2):212-23.
- See SW, Balasubramanian R, Joshi UM. Physical characteristics of nanoparticles emitted from incense smoke. *Science and Technology of Advanced Materials* 2007;8(1-2):25-32.
- Jo WK, Lee JH, Lim HJ, Kwon KD, Jeong WS. Assessment of organic compounds emission from consumer products in an environmental chamber system. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2007;23(E2): 39-46

- Chiang KC, Liao CM. Heavy incense burning in temples promotes exposure risk from airborne PMs and carcinogenic PAHs. *Sci Total Environ* 2006;372(1):64-75.
- Pope CA, Dockery DW. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association* 2006;56(6):709-742.
- Wang B, Lee SC, Ho KF. Chemical composition of fine particles from incense burning in a large environmental chamber. *Atmospheric Environment* 2006;40(40):7858-7868.
- Lee SC, Wang B. Characteristics of emissions of air pollutants from burning of incense in a large environmental chamber. *Atmospheric Environment* 2004;38(7):941-951.
- Lung SC, Hu SC. Generation rates and emission factors of particulate matter and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons of incense sticks. *Chemosphere* 2003;50:673-679.
- Lung SC, Kao MC, Hu SC. Contribution of incense burning to indoor PM₁₀ and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons under two ventilation conditions. *Indoor Air* 2003;13:194-199.
- Jetter JJ, Guo ZS, McBrien JA, Flynn MR. Characterization of emissions from burning incense. *The Science of the Total Environment* 2002;295:51-67.
- Townsend CL, Maynard RL. Effects on health of prolonged exposure to low concentrations of carbon monoxide. *Occupational and Environmental Medicine* 2002;59(10):708-711.

= ABSTRACT =

A Study on the Reduction of Inhalation Exposure to Particulate Emissions from Burning Incense

Jimin Kim
Dept. of Environmental Health,
Graduate School of Public Health,
Yonsei University, Seoul, Korea

(Directed by Professor Changsoo Kim, M.D., Ph.D.)

Indoor air pollution caused by combustion-type air fresheners has garnered increasing attention in recent years, particularly due to the emission of fine particulate matter, which poses significant health risks. Despite their widespread use in residential and commercial spaces for aesthetic and cultural purposes, scientific evaluations of their emission characteristics and associated health risks remain limited.

This study aimed to quantitatively assess the impact of burning incense on indoor air quality by analyzing particulate matter (PM_{10} , $PM_{2.5}$) generated during combustion under three different ventilation scenarios: (1) no ventilation, (2) ventilation after combustion, and (3) continuous natural ventilation throughout combustion. Based on these measurements, inhalation exposure concentrations and health risks were evaluated to inform safer usage practices and the development of effective exposure mitigation strategies for indoor environments.

Two commercially available incense stick products, designated as Incense A and Incense B, were selected for the experiments. Tests were conducted in a sealed environmental chamber measuring approximately $3m^3$.

Real-time particulate matter concentrations were measured using a Portable Aerosol Spectrometer(Grimm 11-D), with data collected at 6-second intervals over a 90-minute period, encompassing baseline, combustion, and post-combustion phases.

Results showed a sharp increase in particulate matter concentrations immediately after ignition under all ventilation conditions, with substantial differences in concentration levels and decay rates depending on the scenario. In the absence of ventilation (Scenario 1), particulate matter concentrations exceeded the WHO-recommended indoor air quality guidelines, and the decay rate was the slowest among all scenarios, resulting in the highest inhalation exposure and associated health risk. Conversely, Scenario 3 (continuous natural ventilation) achieved the most effective particulate matter reduction, with concentrations returning to background levels within 30 minutes. Under this condition, health risks associated with PM_{10} and $PM_{2.5}$ were reduced by 68.2% and 69.2%, respectively, compared to Scenario 1. Scenario 2 (ventilation initiated after combustion) also showed significant reductions, with particulate matter levels decreasing to baseline within approximately 25 minutes. Health risks from PM_{10} and $PM_{2.5}$ in this scenario were reduced by 45.0% and 42.4%, respectively, relative to the no-ventilation condition.

These findings emphasize the critical role of ventilation in mitigating the adverse health effects of particulate matter generated from incense combustion. This study provides scientific evidence on the health risks posed by particulate pollutants emitted from burning incense and underscores the importance of proper ventilation strategies. The findings offer a basis for the development of health risk assessments and environmental safety guidelines related to indoor air pollutant exposure.

Key words : Burning Incense, Particulate matter, Risk assessment,
Combustion By-Products, Inhalation exposure