실내 SVOC의 다경로 노출 및 건강 위해성 평가 : 집 먼지와 유기 필름을 활용한 이중 매트릭스 접근법

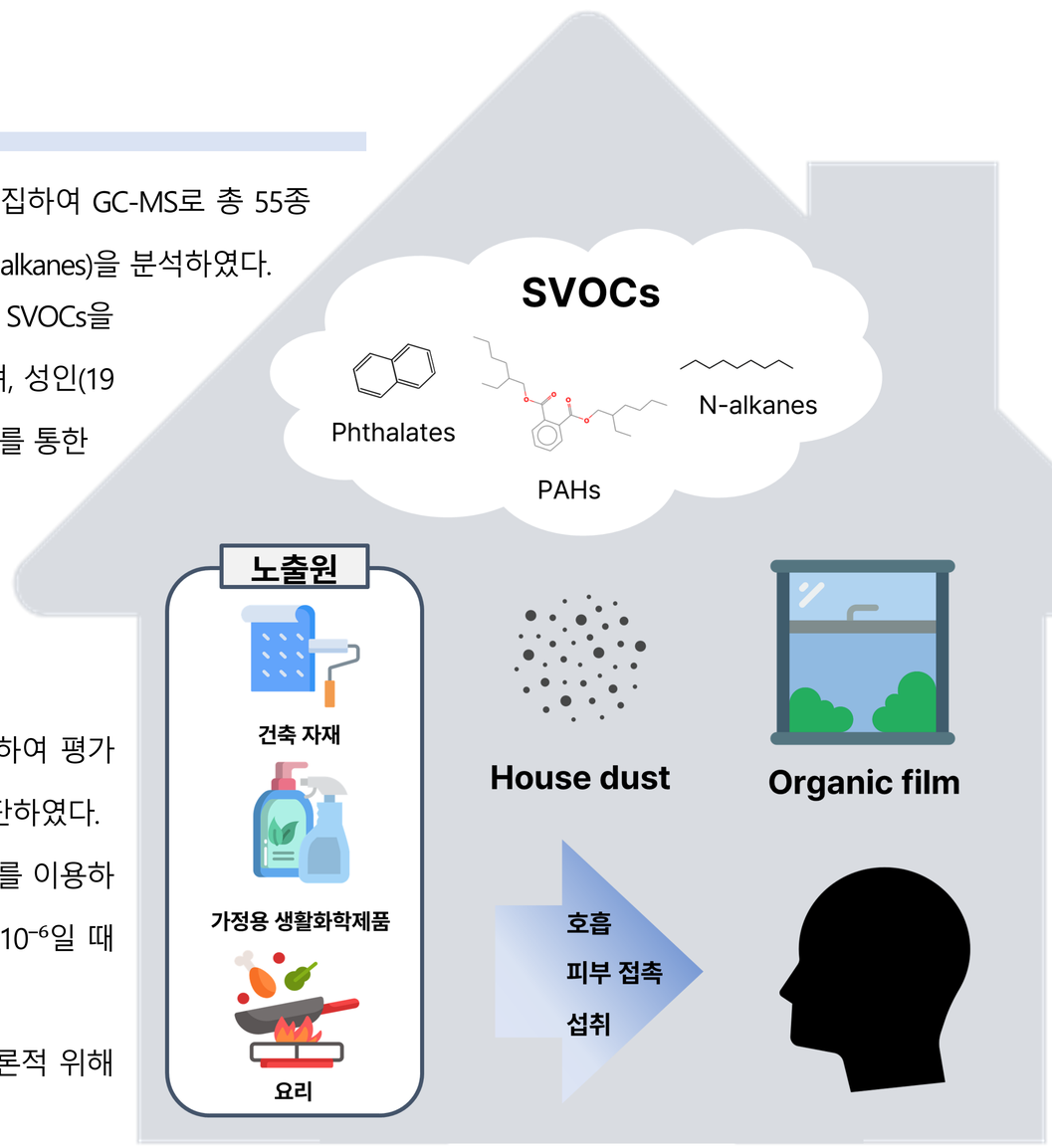
이지윤 고려대학교 일반대학원 보건안전융합과학과 석사과정, L-HOPE 건강공간 기반 러닝헬스시스템 교육연구단
최윤희 원광대학교 안전보건학과 조교수
서지훈 고려대학교 보건과학연구소 연구교수

1.서론

- 가정환경에서는 건축 자재, 소비자제품, 요리 과정 등을 통해 프탈레이트, 다환방향족탄화수소 (PAHs), n-alkanes 등의 반휘발성 유기화합물(SVOCs)이 지속적으로 방출된다.
- 일부 SVOCs 물질은 급성독성 및 암을 포함한 건강 영향을 일으킬 수 있으며, 환경 조건에 따라 가스, 먼지, 입자 등의 형태로 흡입, 섭취, 피부 접촉을 통해 인체에 노출될 수 있다.
- 기존 공기 샘플링 방식은 급성 흡입노출 평가 시에는 효과적이지만, 만성노출 혹은 다경로 노출을 과소평가하는 한계가 있어 이를 극복하기 위해 집먼지와 유기 표면 필름이 주목받고 있다.
- 그러나 기존 연구는 집먼지 혹은 유기 필름을 개별적으로 평가하거나, 샘플링 물질과 분석 방법이 상이하여 직접적인 결과 비교가 어려웠다.
- 또한 두 매트릭스를 활용한 다경로 노출 및 건강위해성평가 연구는 거의 수행되지 않았다.
- 따라서 본 연구에서는 서울의 주거 환경에서 집먼지와 유기 필름을 동시 수집하여 SVOCs 농도를 측정하고, 흡입・경구・경피 경로에 대한 노출 용량을 추정하여 건강 위해성평가를 진행하고자 하였다.

2. 방법

- 서울의 주거지 60곳에서 먼지와 유기 필름 샘플을 수집하여 GC-MS로 총 55종의 SVOCs (8종 프탈레이트, 16종 PAHs, C10—C40의 n-alkanes)을 분석하였다.
- 검출률이 60% 이상이며, 독성참고치가 존재하는 21종 SVOCs을 선정하여 가스상, 입자상, 먼지상 농도를 계산하였으며, 성인(19세 이상)과 아동(0–6세)의 흡입・경구・경피 노출 경로를 통한 일일평균노출량(ADD)을 추정하였다.
- SVOC 노출원 확인을 위해 건물 연식, 보수 상태, 생활화학제품 사용 수, 환기 빈도 및 자녀 유무 등에 대한 설문조사를 진행하였다.
- 비발암성 위해성은 위해지수(HQ = ADD/RfD)를 이용하여 평가하였으며, HQ ≥ 1일 때 위해성이 존재하는 것으로 판단하였다.
- 발암성 위해성은 초과발암위해도(ECR = LADD × CSF)를 이용하여 평가하였으며, ECR > 10^{-4}일 때 위해 우려, ECR ≤ 10^{-6}일 때 수용 가능한 것으로 판단하였다.
- 잠재적 노출원 규명을 위한 주성분 분석(PCA)과 확률론적 위해성평가를 위한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.



3. 결과 및 토의

- 집먼지에서는 DEHP, 벤조[g,h,i]페릴렌, C23H48이 가장 높은 농도로 검출되었고, 유기 필름에서는 DEHP, 나프탈렌, C11H24가 가장 높은 농도로 검출되었다. 두 매트릭스 모두 건물 연식 20년 이상, 청소 빈도 주 1~2회, 자녀 없는 가구에서 SVOC 농도가 유의하게 높게 나타났다.
- PCA 분석 결과, 집먼지는 저-중분자량 화합물과 장쇄 n-알케인이 주요 기여 물질로 나타나 개인 관리 제품, 가구 코팅, 단기 연소 배출 등 다양한 노출원을 반영한 반면, 유기 필름은 고분자량 화합물과 단쇄 n-알케인이 주로 기여하여 PVC 제품 및 소비자 제품의 휘발성 배출 등 특정 노출원의 장기 축적 특성을 나타냈다.
- 집먼지에서 흡입 경로는 나프탈렌, 경피 경로는 DBP, 경구 경로는 DEHP의 ADD가 가장 높았다. 유기 필름은 집먼지와 동일한 패턴을 보였으나 전반적으로 더 낮은 ADD를 나타냈다.

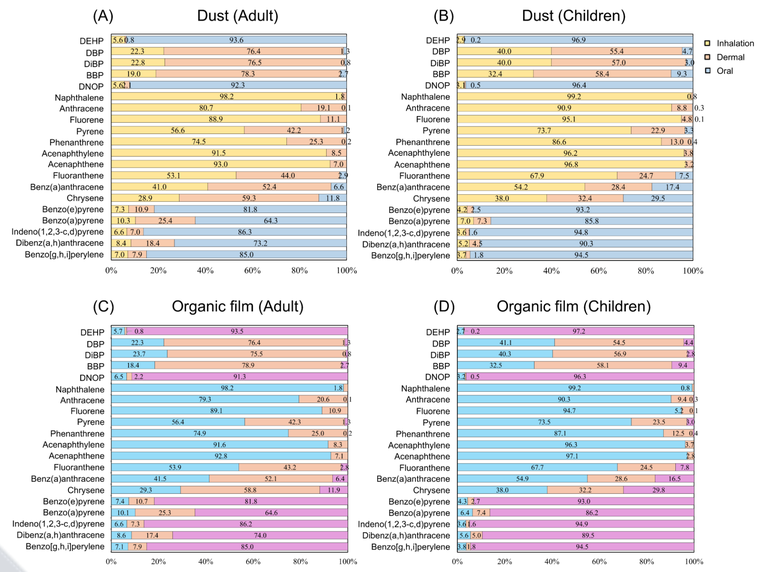


Fig. 1. Contribution of each exposure pathways to ADD of SVOCs obtained from dust and organic films: (A)–(B) dust samples, (C)–(D): organic film samples.

- 노출 기여도 분석 결과(Fig.1), 먼지 섭취는 DEHP, DNOP 등 고분자량 프탈레이트의 주요 경로이며, 흡입은 나프탈렌, 안트라센 등 저분자량 PAHs의 주요 경로였다. 경피 노출의 기여도는 전반적으로 낮았다.
- 건강 위해성 평가 결과, 나프탈렌이 주요 비발암 위해 우려 물질로 확인되었으며, 성인과 아동 모두에서 흡입 HQ가 1을 초과했다(Fig.2).

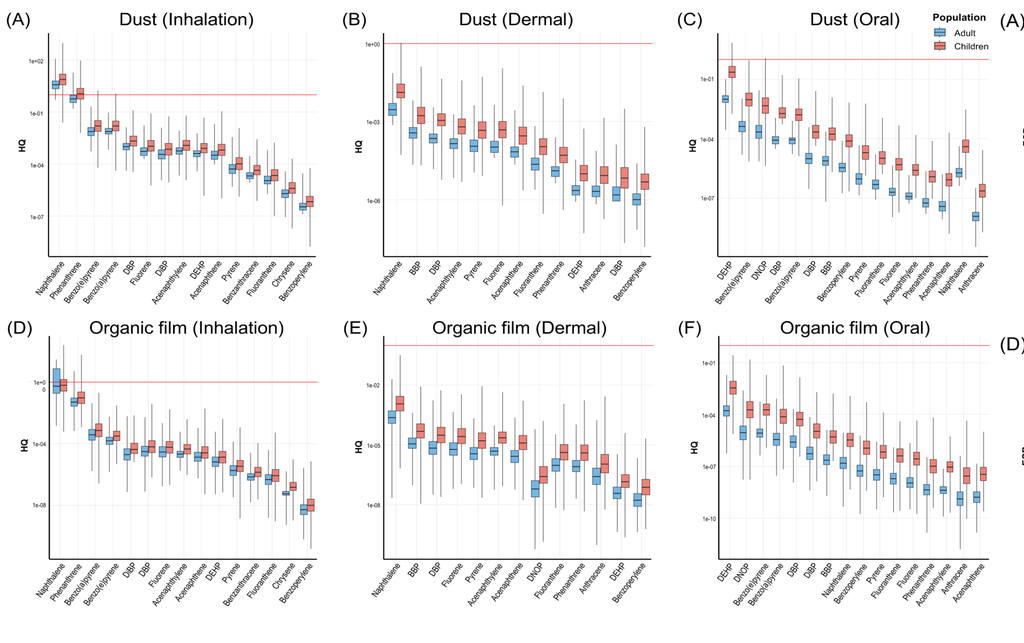


Fig. 2. Non-carcinogenic risks of exposure to SVOCs: (A)–(C) dust samples, (D)–(F): organic film samples.

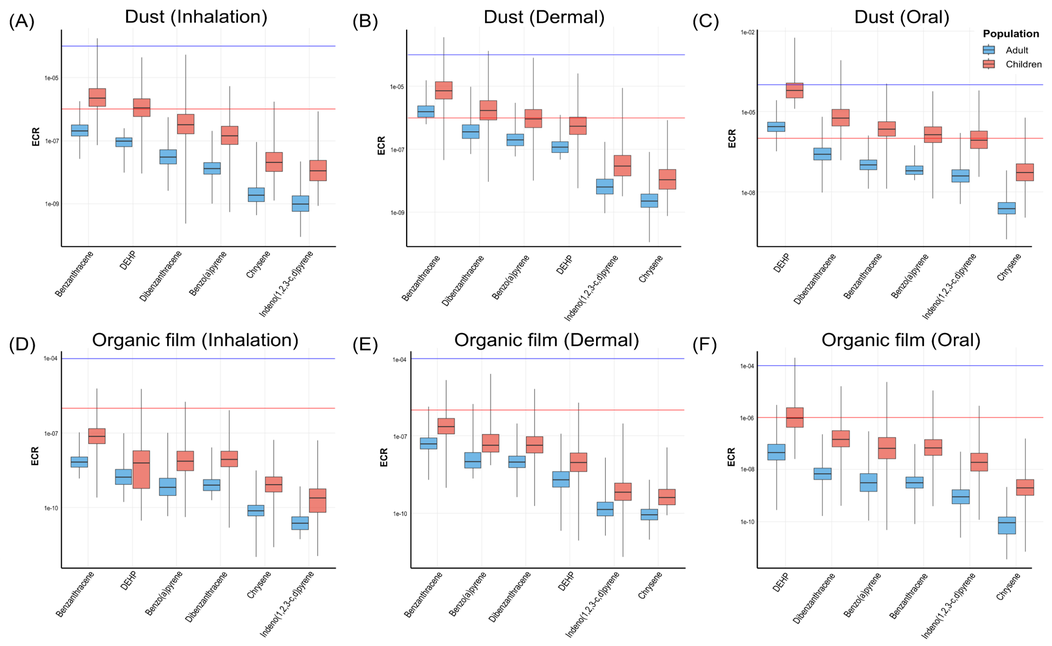


Fig. 3. Carcinogenic risks of exposure to SVOCs: (A)–(C): dust samples, (D)–(F): organic film samples.

- 발암 위해도 평가에서는 DEHP와 벤조[a]피렌 등의 특정 PAHs가 아동의 경구 섭취 경로를 통해 임계값(10^{-4})을 초과했다(Fig.3).
- 유기 필름이 집먼지에 비해 전반적으로 낮은 위해 추정치를 나타냈으며, 아동이 성인보다 더 높은 노출과 위해 추정치를 보였다.

4. 결론

- 본 연구는 주거 환경에서 집먼지와 유기 필름을 동시 분석하여 55종 SVOCs의 오염 특성을 규명하고, 다경로 노출 및 건강위해성을 평가하였다.
- 두 매트릭스 모두에서 프탈레이트, PAHs, n-alkanes의 광범위한 오염이 확인되었으며, 각각 상이한 노출원과 축적 특성을 나타냈다.
- 집먼지는 입자 결합 상태로 존재하거나 섭취를 통해 노출되는 SVOCs를 민감하게 반영하는 반면, 유기 필름은 표면 침착 후 재방출되어 경피 및 흡입 경로로 노출되는 SVOCs를 효과적으로 포착하였다.
- 이중 매트릭스 접근법은 실내 SVOCs의 전체 스펙트럼을 포착하여 보다 완전하고 대표적인 노출 평가를 가능하게 하며, 노출원 제어, 환기 관리, 청소 전략 등 표적 개입을 위한 과학적 근거를 제공할 수 있다.

이 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 가정용 화학제품 안전관리 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었으며 (1485017563), 한국 과학기술정보통신부(MSIT)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었다 (RS-2024-00406500, RS-2025-00561448).