

연구논문

실내 바닥먼지 내 프탈레이트류 및 대체 가소제류 모니터링을 통한 노출 특성 연구

강다영¹ · 조정흠² · 김승중¹ · 이학주¹ · 천사호^{1†}

¹(재)FITI 시험연구원
²국립환경과학원 환경보건연구과

Exposure Characteristics of Phthalates and Alternative Plasticizers in House Dust

DaYoung Kang¹, JungHeum Jo², SeungJung Kim¹, HakJoo Lee¹, and Sa-Ho Chun^{1†}

¹FITI Testing and Research Institute, Korea

²Environmental Health Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

Received September 11, 2025 / Revised September 19, 2025 / Accepted October 23, 2025

This study analyzed 1,640 indoor floor dust samples collected between 2015 and 2019 as part of the “Children's Environmental Health Birth Cohort” project. The aim was to assess phthalate and alternative plasticizer contamination, their temporal trends, and the exposure implications for children. Gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) was used to ensure accurate quantification of the phthalates and plasticizers and the established analytical method successfully met all validation criteria for linearity, accuracy, and precision. Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP), diisononyl phthalate (DINP), and dioctyl terephthalate (DOTP) were detected in 100% of samples at high average concentrations of 1670.3 mg/kg, 525.7 mg/kg, and 1462.6 mg/kg, respectively. Other alternative plasticizers (di(2-ethylhexyl) adipate, acetyl tributyl citrate, tris(2-ethylhexyl) phthalate, and diisononyl 1,2-cyclohexanedicarboxylic acid) were found at lower detection rates and concentrations. An analysis of the floor dust revealed that DEHP and DINP concentrations began to decline from 2015 onwards and this decline was concurrent with a progressive increase in DOTP levels. Monitoring phthalates and alternative plasticizers in indoor floor dust is essential when assessing child exposure risks. While alternative plasticizers were generally present at lower concentrations in dust compared to traditional phthalates, their increasing use and detection in indoor environments warrant ongoing surveillance and evaluation of their health impacts.

Key words: Phthalates, Alternative Plasticizers, Floor Dust

1. 서 론

프탈레이트류는 주로 합성수지 제품의 가소성을 부여하기 위해 사용되는 첨가제로 폴리염화비닐 (PVC) 기반 제품, 식품 포장재, 어린이 장난감, 의료 기기, 접착제, 건축 자재, 실내 가구 및 전자 제품, 화장품 및 개인 위생용품 등 실내 공간에 존재하는 다양한 소비자 제품에 원료 물질로 광범위하게 사용된다.^{1,2)}

프탈레이트류는 인체 건강에 유해성(예: 내분비계 교란, 발암성, 생식 및 발달 영향)이 보고되면서 전 세계적으로 규제가 강화되고 있다. 예를 들어, 2006년 EU REACH 규정 (No. 1907/2006) Annex XVII 에 따라 대부분의 고형 완제품에서 0.1% (w/w) 이상의 사용이 제한되고 있으며, 국내·외 제품 관련 기준에서도 프탈레이트의 의도적인 사용이 유사하게 제한되고 있다. 이러한 프탈레이트류의 전 세계적인 규제로 인해 dioctyl terephthalate

[†]To whom correspondence should be addressed.

(DOTP), acetyl tributyl citrate (ATBC) 등 다양한 대체 물질 (Alternative Plasticizers, APs) 이 사용되고 있으며, 이 대체 물질들의 유해성 확인을 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 기존 유해 물질을 독성 평가가 불충분한 대체 물질로 바꾸는 “후회스러운 대체 (Regrettable Substitution)” 우려가 제기되고 있으며, 이는 bisphenol A (BPA)나 dichloro-diphenyl-trichloroethane (DDT)와 같은 사례에서 유사한 독성이 후속적으로 발견된 역사적 배경을 가지고 있다. 실제로 일부 대체 가소제(예: 아세틸 트리부틸 시트레이트, 디이소노닐 시클로헥산-1,2-디카복실레이트, 트리스-2-에틸헥실 포스페이트 등)는 잠재적인 독성 영향을 가질 수 있음이 보고되었다.³⁻⁵⁾

프탈레이트류 및 대체 가소제류는 반휘발성 유기화합물 (Semi-volatile Organic Compounds, SVOCs) 로 분류되며, 실내 공간에서 일반적인 거동은 물질의 낮은 증기압으로 인해 방출된 후 실내 공간의 벽, 바닥, 공기 중 입자상 물질에 쉽게 흡착되는 특징을 보인다. 특히 SVOCs 가 흡착된 입자상 물질은 바닥으로 침전되며, 침전된 먼지는 바닥에 존재하는 SVOCs 노출원(예: 바닥재)의 표면과 공기 사이의 계면에서 SVOCs 가 입자상 물질로 전이되어, 입자상 물질 중 SVOCs 의 농도를 증가시킬 수 있다.^{6,7)} 즉, 실내 공간의 다양한 노출원에서 SVOCs의 방출, 실내 공간 표면 혹은 입자상 물질로의 흡착, 입자상 물질의 낙하, 바닥의 노출원에서 먼지로의 전이, 실내 공간의 표면 혹은 입자상 물질에 흡착된 물질의 탈착 그리고 환기, 먼지 제거 등을 통해 다양한 거동 양상이 나타나며, 이 거동에 따라 실내 공간 내에서 SVOCs 는 다양한 노출 특성을 가질 수 있다. 이러한 복잡한 거동은 인체로의 정확한 노출량을 파악하기 어렵게 만든다.⁶⁻⁸⁾

특히, 실내 공간 내 방출된 SVOCs 가 부유 먼지와 흡착하여 낙하한 실내 바닥 먼지의 경우, 영유아와 어린이에게서 자주 나타나는 ‘손-입 (Hand-to-Mouth)’ 행동을 통한 직접 섭취 등을 통해 SVOCs의 주요 노출원으로 작용할 수 있다. 선행 연구에 따르면 SVOCs 로 대표되는 di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) 가 함유된 단일 제품의 직접 접촉을 통한 경피 노출, 실내 공간 내 DEHP의 방출에 따른 흡입 및 경피 노출, 그리고 흡착된 먼지 섭취를 통한 경구 노출 시나리오를 대상으로 모델식을 활용하여 각 노출 경로에 따른 노출 비율을 평가한 결과, 3세 미만의 영유아 인구집단의 경우 DEHP 의 실내 바닥 먼지 섭취를 통한 노출 비율이 90% 이상으로 산출되었다.⁷⁾ 이는 DEHP 의 모니터링 자료 등을 활용한 국내 연구 결과에서도 영유아의 인구집단에서 노출매체(식품/토

양/먼지/접촉/호흡)별 실내 바닥 먼지를 통한 DEHP의 노출 기여율은 44%로 확인되며, 영유아와 같은 특정 인구 집단에는 실내 바닥 먼지를 통해 상당한 양의 프탈레이트류가 노출될 수 있음을 보여준다.⁹⁾

따라서 프탈레이트류 및 대체 가소제류의 물질 특성에 따라 실내 공간에서 바닥 먼지와 흡착하여 존재할 수 있으며, 실내 공간의 다양한 노출 매체 중 영유아와 같은 민감 취약 계층에는 바닥 먼지를 통한 노출 비율이 높다고 보고되므로, 실제 노출량 평가를 위해서는 실내 바닥 먼지 중 대상 물질에 대한 충분한 모니터링 데이터 확보가 필수적이다.^{10,11)} 그러나 그간 국내 실내 바닥 먼지 분석 연구는 시료 채취의 어려움, 공인 시험 방법의 부재 및 낮은 정량 한계 요구 등으로 인해 축적된 모니터링 결과가 제한적인 실정이다.^{8,9)}

따라서 본 연구는 2015년부터 2036년까지 환경부(국립환경과학원)에서 수행 중인 ‘어린이 환경 보건 출생 코호트’ 연구 사업 중 대상자 가정 내 환경 측정(2015년~2019년)을 통해 확보된 약 1,800여 개의 실내 바닥 먼지 샘플을 대상으로 프탈레이트류 및 대체 가소제류의 최적화된 시험 방법을 도출하고, 해당 방법을 적용하여 실내 바닥 먼지 분석을 수행함으로써 프탈레이트류 및 대체 가소제 노출량 평가의 기초 자료로 활용하며, 모니터링 결과를 바탕으로 국내 실내 바닥 먼지 중 프탈레이트류 및 대체 가소제류 함량 특성을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실내 바닥먼지의 시료정보

‘어린이 환경보건 출생코호트’ 사업과 연계하여 채취된 시료는 2015년~2019년 사이에 연구 대상자 가정의 실내 공간에서 채취된 약 1,800 지점의 실내 바닥먼지 시료가 대상이며, 시료 확인 결과 채취된 시료는 -35°C~20°C의 냉장에서 보관하였다. 기존 연구결과를 참고하여 시료의 먼지와 험잡물 분리를 위해 500 μm의 표준체 (sieve)를 활용하였으며, 분리된 시료는 오염방지를 위해 유리관에 담아 -25°C에서 보관하였다.¹²⁻¹⁵⁾ 향후 재현성 및 재분석을 고려한 최소 시료량 (500 mg 이상 시료)을 선별한 결과, 최종적으로 1,640개의 대상시료에 대하여 프탈레이트류와 대체 가소제류를 분석 하였다.

2.2. 분석대상 프탈레이트류 및 대체 가소제류

실내 바닥먼지 중 분석의 대상이 되는 프탈레이트류 및 대체 가소제류는 현재 국내의 강제 및 임의 인증 그리고

선행연구사례 등에서 확인된 프탈레이트류 13종과 대체 가소제류 5종, 총 18종을 선정하였다(Table 1).^{8,9,16,17)} 대체 가소제류로는 기존 규제 강화 대상 프탈레이트류의 안전 대안으로 산업 현장에서 활발히 사용되고 있는 DOTP, ATBC, di(2-ethylhexyl) adipate (DEHA), diisononyl 1,2-cyclohexanedicarboxylic acid (DINCH), tris(2-ethylhexyl) phthalate (TOTM)를 대표적으로 분석하였다.

2.3. 시약 및 재료

프탈레이트류 및 대체 가소제류 시험을 위하여 사용된 표준물질 정보는 다음과 같다. DMP는 TCI (P/N:P0302, TCI, Tokyo, Japan)에서, DEP는 TCI (P/N:P0296, TCI, Tokyo, Japan)에서, DBP는 TCI (P/N:P0292, TCI, Tokyo, Japan)에서, DIBP는 Sigma-Aldrich (P/N:152641, Merck, Daramstadt, Germany)에서, DNPP는 TCI (P/N:P0291, TCI, Tokyo, Japan)에서, BBP는 TCI (P/N:P0288, TCI, Tokyo, Japan)에서, DCHP는 TCI (P/N:P0293, TCI, Tokyo, Japan)에서, DNHP는 TCI (P/N:P1344, TCI, Tokyo, Japan)에서, DEHA는 TCI (P/N:A0163, TCI, Tokyo, Japan)에서, DEHP는 TCI (P/N:P0297, TCI, Tokyo, Japan)에서, DNOP는 TCI (P/N:P0304, TCI, Tokyo, Japan)에서, DOTP는 AccuStandard (P/N:PLAS-PL-065N, AccuStandard, New Haven, CT, USA)에서, ATBC는 SUPELCO (P/N:PHR1156, Merck, Daramstadt,

Germany)에서, DINP는 AccuStandard (P/N:ALR-102N, AccuStandard, New Haven, CT, USA)에서, DINCH는 TRC Canada (P/N:H296710, TRC, Toronto, Canada)에서, DIDP는 AccuStandard (P/N:ALR-101N, AccuStandard, New Haven, CT, USA)에서, DPHP는 TRC Canada (P/N:B523500, TRC, Toronto, Canada)에서, TOTM은 TRC Canada (P/N:T886300, TRC, Toronto, Canada)사의 표준물질을 구매하여 모니터링에 사용하였다. 내부표준물질로 사용된 benzyl benzoate-d₁₂ (BB-d₁₂)는 TRC Canada (P/N:TRC-B230952, TRC, Toronto, Canada)에서, 대체표준물질로 사용된 di(2-ethylhexyl) phthalate-d₄ (DEHP-d₄)는 AccuStandard (P/N:PHTH-D4-011S-H, AccuStandard, New Haven, CT, USA)에서, dibutyl phthalate-d₄ (DBP-d₄)는 SUPELCO (P/N:34169, Merck KGaA, Daramstadt, Germany)에서 구입하여 사용하였다. 추출용매로 사용된 hexane 및 dichloromethane (DCM)은 DUKSAN (Ansan, Korea)에서 구입하여 사용하였다.

2.4. 전처리 및 분석

실내 바닥면지 중 프탈레이트류 및 대체 가소제류의 시험법은 US EPA Method 8061A 방법 등으로 적용이 가능하다고 알려져 있으나 공인된 시험법은 아직 확립되지 않았다. 기존 연구사례를 검토^{8,9,16,17)} 하여 실내 바닥면

Table 1. Phthalates and alternative plasticizers monitored in this study

No.	Group	Compounds	CAS No.
1	Phthalates	Dimethyl phthalate (DMP)	131-11-3
2		Diethyl phthalate (DEP)	84-66-2
3		Dibutyl phthalate (DBP)	84-74-2
4		Di-iso-butyl phthalate (DIBP)	84-69-5
5		Di-n-pentyl phthalate (DNPP)	131-18-0
6		Butyl benzyl phthalate (BBP)	85-68-7
7		Dicyclohexyl phthalate (DCHP)	84-61-7
8		Di-n-hexyl phthalate (DNHP)	84-75-3
9		Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)	117-81-7
10		Di-n-octyl phthalate (DNOP)	117-84-0
11		Diisononyl phthalate (DINP)	28553-12-0
12		Diisodecyl phthalate (DIDP)	26761-40-0
13		Di(2-propylheptyl) phthalate (DPHP)	53306-54-0
14	Alternative plasticizers	Di(2-ethylhexyl) adipate (DEHA)	103-23-1
15		Di(2-ethylhexyl) terephthalate (DOTP)	6422-86-2
16		Acetyl tributyl citrate (ATBC)	77-90-7
17		Diisononyl 1,2-cyclohexanedicarboxylic acid (DINCH)	166412-78-8
18		Tris(2-ethylhexyl) phthalate (TOTM)	89-04-3

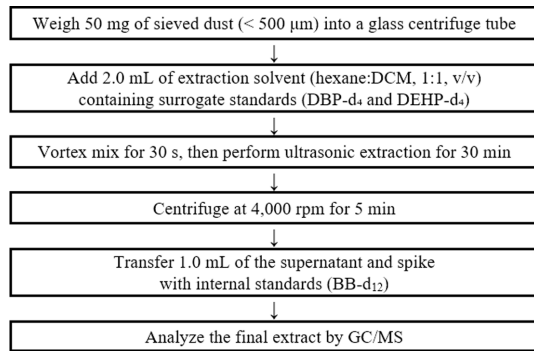


Fig. 1. Analytical procedure for phthalates and alternative compounds in indoor settled dust

지 중 프탈레이트류 및 대체 가소제류의 적절한 전처리 방안 및 분석 절차를 다음의 Figure 1과 같이 확립하였다.

기존 연구에서 주로 사용된 추출 용매는 dichloromethane 등의 단일 용매 또는 분석 물질의 특성(극성 및 비극성)을 고려한 hexane 및 acetone 의 혼합 용매이다.^{8, 9, 16, 17} 본 연구에서는 다양한 추출 용매 중 국내 연구사례에서 적용된 hexane:dichloromethane (1:1 v/v %)을 추출 용매로 적용하였다.⁹ 추출 방법의 경우 대표적인 프탈레이트류 추출 방법인 속슬렛 (Soxhlet) 및 초음파 추

출이 고려될 수 있으나, 프탈레이트류 등은 열에 민감하여 분석과정 중 변성되거나 분해될 수 있으므로, 열에 의한 분해 가능성이 낮으며 상대적으로 효율적인 초음파 추출을 적용하였다.^{16, 20, 25}

실내 바닥면지 중 프탈레이트류 및 대체 가소제류의 전처리는 대상시료 약 50 mg을 12 mL 유리관에 넣은 후 혼합용매 (hexane:dichloromethane (1:1 v/v)) 2 mL와 대체 표준물질 (DBP-d₄, DEHP-d₄) 을 유리원심관에 첨가하여 볼텍스 믹서로 30초간 교반한 뒤, 40°C로 맞춘 초음파 추출기에 넣고 30분 간 추출하였다. 이후 30분간 실온에서 방치한 뒤 원심분리기를 사용하여 4000 rpm으로 5분간 원심 분리하였다. 그 후 시료용액의 상등액을 분취한 뒤 내부표준용액 (BB-d₁₂)을 첨가하여 0.45 μm PTFE 재질의 시린지 필터로 여과한 액을 시험용액으로 하여 GC/MS (QP2020, Shimadzu, Kyoto, Japan) 로 분석하였다. GC/MS 분석은 주입구 온도는 270°C, 이송관 온도와 이온소스 온도는 각각 260°C, 230°C를 유지하였으며, 운반 기체 (He) 유량은 1.0 mL/min, 시료 주입량은 1.0 μL, 시료 주입시 비분할 모드 (Splitless) 를 적용하였다. 컬럼은 DB-5MS (P/N:122-5532, Agilent, Santa Clara, CA, USA)를 사용하였으며, 오븐 조건은 100°C에서 2분간 유

Table 2. Phthalate and alternative plasticizer retention times and selected ions for GC/MS

Compounds	Retention time (min)	Selective ion (Q1, m/z)	Selective ion (Q2, m/z)
Dimethyl phthalate (DMP)	7.97	163	77, 92
Diethyl phthalate (DEP)	8.97	149	177, 223
Dibutyl phthalate (DBP)	11.46	149	223, 205
Di-iso-butyl phthalate (DIBP)	10.73	149	223, 205
Di-n-pentyl phthalate (DNPP)	12.61	149	237, 219
Butyl benzyl phthalate (BBP)	14.31	149	91, 206
Dicyclohexyl phthalate (DCHP)	15.22	149	167, 249
Di-n-hexyl phthalate (DNHP)	13.68	149	251, 223
Di(2-ethylhexyl) adipate (DEHA)	13.40	129	112, 147
Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)	14.55	149	167, 279
Di-n-octyl phthalate (DNOP)	15.64	149	279
Di(2-ethylhexyl) terephthalate (DOTP)	15.39	261	149, 293
Acetyl tributyl citrate (ATBC)	12.94	185	129, 259
Diisononyl phthalate (DINP)	15.68	293	127
Diisononyl 1,2-cyclohexanedicarboxylic acid (DINCH)	15.69	155	281, 252
Diisodecyl phthalate (DIDP)	16.39	307	141
Di(2-propylheptyl) phthalate (DPHP)	15.83	149	167
Tris(2-ethylhexyl) phthalate (TOTM)	20.32	305	193
Benzylbenzoate-d ₁₂ (BB-d ₁₂)	10.43	224	110
Dibutyl phthalate-d ₄ (DBP-d ₄)	11.46	153	227, 209
Di(2-ethylhexyl) phthalate-d ₄ (DEHP-d ₄)	14.55	153	171, 283

지한 후 340°C까지 분당 15°C씩 상승시킨 후 5분간 유지하였다. 분석대상물질 18종 및 내부표준물질 등의 질량분석기의 선택이온은 Table 2에 나타내었다.

분석시료의 정량을 위하여 DINP, DIDP, DINCH 표준용액은 0.05 mg/L~2.0 mg/L의 범위에서, DEHP를 포함한 15종은 0.01 mg/L~0.5 mg/L 범위에서 각각 5개 이상 제조한 후 내부표준법으로 적용하여 정량하였다. 각 시료에 첨가된 대체표준물질 (DBP-d₄, DEHP-d₄)과 매 20개 시료 분석마다 측정된 검정표준용액의 회수율은 허용오차(± 20%) 이내로 확인되었다. 시약 및 시험 환경조건으로부터 발생한 오염을 확인하기 위해 100개 시료마다 1개의 방법비탕시료를 분석하였고 모두 방법검출한계 (Method Detection Limit, MDL) 미만으로 확인되었다.

2.5. 시험법 유효성 검증

본 연구에서 적용한 시험법의 유효성 검증은 국립환경과학원 고시인 “환경유해인자 공정시험기준”의 “ES 12001.0 정도보증/정도관리”의 절차를 준용하였다. 직선성 (Linearity)의 경우, 2.3의 검정 곡선 범위에서 상관계수(R²) 및 감응계수 (RF, Response Factor)를 확인하였다. 정확도 (Accuracy) 및 정밀도 (Precision) 확인을 위하여, ISO 표준먼지 (ISO 12103-1. A4 coarse test dust, PIT, 88 µm > 85.0~86.5%) 50 mg에 50 mg/L의 3종 (DINP,

DIDP, DINCH) 혼합표준용액과 10 mg/L의 15종 혼합표준용액을 20 µL씩 첨가하여 7회 반복 분석하였다. 정확도의 경우, 소량첨가시료를 분석한 측정값을 이론 값의 회수율로서 나타내었고, 정밀도는 측정값의 상대표준편차 (% RSD)를 계산하여 산출하였다. 방법검출한계와 정량한계 (Limit of Quantitation, LOQ) 산출을 위하여 ISO 표준먼지 50 mg에 5 mg/L의 3종 (DINP, DIDP, DINCH) 혼합표준용액과 1 mg/L의 15종 혼합표준용액을 20 µL씩 첨가하여 7회 반복 분석하였다. 분석 값의 표준편차 (Standard Deviation, SD)에 3.14를 곱하여 방법검출한계로, 10을 곱하여 정량한계로 산출하였다. 시험법 밸리데이션의 목표값은 검정곡선의 결정계수 (R²)가 0.99 이상 또는 감응계수 (RF)의 상대표준편차가 20% 이내가 되도록 설정하였으며, 정확도는 반복측정에 의한 회수율로 70~130% 이내 정밀도는 반복측정에 의한 상대표준편차로 30% 이내로 되도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실내 바닥먼지 내 프탈레이트류 및 대체 가스제류 시험법의 유효성 검증 결과

프탈레이트 13종 및 대체 가스제 5종 분석 유효성 결과는 Table 3에 나타내었다. 검정곡선의 결정계수 (R²)는

Table 3. Validation results for phthalates and alternative plasticizers

Compounds	Range (mg/L)	Linearity (R ²)	Response factor (%)	Accuracy (Recovery, %)	Precision (RSD, %)	Method Detection Limit (mg/kg)	Limit of Quantitation (mg/kg)
DMP	0.01~0.5	0.9993	4.8	98.8	5.7	0.09	0.28
DEP	0.01~0.5	0.9991	8.0	96.0	5.6	0.13	0.41
DBP	0.01~0.5	0.9984	16.2	96.1	4.7	0.15	0.49
DIBP	0.01~0.5	0.9995	14.0	96.5	3.2	0.10	0.32
DNPP	0.01~0.5	0.9992	8.1	96.0	5.2	0.13	0.41
BBP	0.01~0.5	0.9993	5.5	100.7	6.0	0.11	0.35
DCHP	0.01~0.5	0.9996	5.9	105.3	3.9	0.09	0.30
DNHP	0.01~0.5	0.9995	5.9	97.1	4.2	0.14	0.43
DEHA	0.01~0.5	0.9999	2.6	98.3	4.2	0.12	0.36
DEHP	0.01~0.5	0.9993	17.0	91.0	2.9	0.19	0.61
DNOP	0.01~0.5	0.9999	2.8	99.3	5.3	0.14	0.43
DOTP	0.01~0.5	0.9997	6.3	98.6	4.9	0.11	0.35
ATBC	0.01~0.5	0.9996	4.8	98.5	5.2	0.06	0.20
DINP	0.05~2.0	0.9997	6.2	93.4	3.4	0.29	0.91
DINCH	0.05~2.0	0.9990	11.3	93.5	4.7	0.37	1.17
DIDP	0.05~2.0	0.9996	9.8	96.5	2.9	0.29	0.92
DPHP	0.01~0.5	0.9995	5.5	101.1	5.9	0.14	0.43
TOTM	0.01~0.5	0.9995	12.9	100.4	3.4	0.11	0.34

최소 0.9990 (DINCH)~최대 0.9999 (DNOP), 감응계수 (RF)의 상대표준편차는 최소 2.6% (DEHA)~최대 17.0% (DEHP) 로 확인되었다.

방법검출한계는 최소 0.06 mg/kg (ATBC)~최대 0.37 mg/kg (DINCH), 정량한계는 최소 0.20 mg/kg (ATBC)~최대 1.17 mg/kg (DINCH)으로 산출되었으며, 정확도는 최소 91.0% (DEHP)~105.3% (DCHP), 정밀도는 최소 2.9% (DEHP, DIDP)~최대 6.0% (BBP)로 목표값에 모두 충족하여 본 시험법은 실내 바닥먼지 중 프탈레이트류와 대체 가소제류 분석에 적합한 것으로 확인되었다.

3.2. 실내 바닥먼지 내 프탈레이트류 및 대체 가소제류 함량분석 결과

본 연구의 대상 시료 총 1,640개 중 프탈레이트류 및 대체 가소제류에 대한 검출률(%), 검출된 물질의 평균 및 표준편차, 최대, 최소값을 Table 4에 나타내었다. 실내 바닥먼지 중 DNPP를 제외한 모든 프탈레이트류 및 대체 가소제류는 정량한계 이상으로 검출되었다.

검출률이 100%로 확인된 DEHP, DOTP, DINP의 평균농도는 각각, 1670.3 mg/kg, 1462.6 mg/kg, 525.7 mg/kg이었다. 그러나 DBP, DIBP, BBP, DNOP, DIDP의 경우 평균농도 및 검출률 (mg/kg, %) 각각 (19.8 mg/kg, 99.7%), (7.9 mg/kg, 99.3%), (19.1 mg/kg, 63.6%), (18.8 mg/kg, 0.6%), (30.6 mg/kg, 56.6%)으로 100 mg/kg 미만의 낮

은 수준으로 확인되었다.

2018년 수행된 선행 연구에 따르면, 국내 가정주택 실내 바닥먼지 (n = 36) 내 프탈레이트류 16종을 분석한 결과, DEHP, DINP, DBP, DIBP, DIDP의 검출률은 100%로 나타났으며, 특히 DEHP 및 DINP의 농도는 각각 1394 mg/kg, 540 mg/kg으로 높게 확인되는 등 본 연구 결과와 유사한 것을 확인하였다.⁹⁾ 또한 2020년 수행된 국내 가정주택의 실내 바닥먼지를 채취 (n = 110) 하여 프탈레이트류 8종을 분석한 다른 선행 연구에서도 DEHP의 검출률은 100%로 확인되었으며, 이 때 DEHP 평균농도는 1870.52 mg/kg이었다.⁸⁾ 기존의 두 연구에서는 대체 가소제류인 DOTP는 분석하지 않아 비교할 수 없었으나 본 연구와 마찬가지로 실내 바닥먼지 내 DEHP의 검출률은 100%이고 농도는 1000 mg/kg 이상으로 분석되었다.

2011년 수행된 국외 프탈레이트류 모니터링 연구 결과에서도 DEHP, DBP, DIBP 검출률이 100%로 나타났으며, 중국 (n = 75)의 실내 바닥먼지 중 DEHP 농도는 9.4 mg/kg~8400 mg/kg, 미국 (n = 33)은 37.2 mg/kg~9650 mg/kg으로 다양한 농도 수준으로 분석됨을 확인하였다.¹⁸⁾

프탈레이트류는 SVOCs 로 실내공기와 집먼지에서 증기 상태와 입자 상태 모두에서 검출될 수 있다. 특히 분자량이 증가할수록 일반적으로 증기압이 감소하며 DEHP나 DINP와 같이 증기압이 낮은 고분자량 프탈레이트는, 제

Table 4. Phthalate and alternative plasticizer contents in house dust (Total, n = 1,640)

Compounds	Detection Rate (%)	Average (mg/kg)	S.D* (mg/kg)	Min** (mg/kg)	Max*** (mg/kg)
DMP	3.3	11.6	31.1	0.5	185.3
DEP	16.5	4.2	0.1	0.4	98.8
DBP	99.7	19.8	39.9	0.9	649.7
DIBP	99.3	7.9	13.1	0.5	194.1
DNPP	-	N.D	-	-	-
BBP	63.6	19.1	43.5	0.7	508.2
DCHP	0.1	29.6	18.5	16.5	42.7
DNHP	0.1	3.2	-	-	3.2
DEHA	62.4	16.1	29.8	0.8	421.0
DEHP	100	1670.3	1783.8	39.5	15415.0
DNOP	0.6	18.8	18.0	5.5	65.2
DOTP	100	1462.6	2028.5	15.4	44277.7
ATBC	85.5	36.1	146.4	0.4	3687.4
DINP	100	525.7	1531.6	4.6	25979.5
DINCH	11.7	136.9	934.7	4.9	12866.7
DIDP	56.6	30.6	74.5	1.4	1531.1
DPHP	55.0	83.6	201.1	0.8	4417.7
TOTM	2.7	2.9	7.9	0.4	51.3

*S.D:standard deviation / **Min:minimum detected value / ***Max:maximum detected value

품에서 실내 공기 중으로 방출된 이후 기체 상태보다는 입자상 물질이나 실내 바닥먼지에 흡착된 형태로 존재할 가능성이 높다.^{6,7)} 반대로, DBP, DIBP등과 같이 증기압이 비교적 높은 저분자량 프탈레이트류는 입자상 물질에 흡착되어 존재하기보다는 실내 공기 중에 기체상으로 존재할 가능성이 높으며, 이로 인해 실내 바닥먼지에서의 검출 비율은 낮을 수 있다.¹⁹⁾ 이러한 각 프탈레이트의 특징은 본 연구에서 측정된 18종의 물질 중 다른 프탈레이트류에 비해 DEHP와 DINP가 실내 바닥먼지 내에 높은 농도로 존재할 수 있는 개연성을 뒷받침해 줄 수 있다.

실내 바닥먼지 중 프탈레이트의 노출원을 확인하기 위해서는 실내 제품 생산 시 프탈레이트 농도의 확인이 고려되어야 한다. 우리나라 어린이제품안전특별법 등에서 0.1% (w/w)의 기준으로 규제되는 프탈레이트 7종 (DBP, DIBP, BBP, DEHP, DnOP, DINP, DIDP) 중 대부분 DEHP 및 DINP만 0.1% 이상으로 그 검출 빈도가 높다고 보고되고 있으며, 그 외 프탈레이트류의 경우 검출 빈도 및 함유 수준은 낮은 것으로 확인된다.^{20,21)} 그리고 DEHP의 대체제로 사용되는 DOTP의 경우, 제품 생산시 DEHP 유사한 수준으로 사용된다고 알려져 있어 본 연구에서 확인한 프탈레이트 노출 특성의 원인이 실내 제품에서 기인할 수 있음을 확인하였다.²²⁾

결론적으로 실내 바닥먼지 중 DEHP, DINP, DOTP 등 특정 프탈레이트류의 높은 농도는 실내공간의 제품 내 프탈레이트 농도와 프탈레이트류의 물리적 특성에 영향을 받는 것으로 확인되었다.¹⁹⁾ 반대로 DBP, DIBP, BBP 등의 물질은 위의 3종에 비해 실내공간의 제품 중 함유 수준도 낮고, 위의 3종에 비하여 실내공기로의 분배가 우선되어 환기에 의한 제거 가능성 등으로 실내 바닥먼지 내 함유량이 적었을 것으로 판단된다.

DOTP 외 대체 가소제인 DEHA, ATBC, TOTM, DINCH의 검출률은 각각 62.4%, 85.5%, 2.7%, 11.7%이었으나, 검출농도는 DEHP, DINP와 비교하면 매우 낮았다. 2022년에 수행된 일본 (n = 100) 가정의 실내 바닥먼지 중 대체 가소제를 대상으로 분석한 선행 연구를 보면, DEHA, ATBC, TOTM의 경우 검출률은 93~100%로 확인되어 본 연구와 차이를 보였으나, 검출 수준은 10 mg/kg ~20 mg/kg으로 DEHP, DINP와 비교하면 본 연구와 유사하게 매우 낮은 수준이었다.²³⁾

대체 가소제류는 물질 특성(증기압, 가스-입자 분배계수 등)에 따라 기체 및 입자상에 모두 존재할 수 있고 (DEHA, ATBC), DEHP와 유사하게 높은 증기압에 의해 입자상 분배가 우선된다(TOTM, DINCH). 다만 DEHA

및 ATBC의 경우, 광분해에 의하여 제거될 가능성이 있다고 보고된다. 이로 미루어 볼 때, 본 연구 결과에서 실내 바닥먼지 중 농도가 50 mg/kg 미만의 낮은 수준으로 확인된 이유는 실내공간의 중 제품 내 대체 가소제의 함유빈도 및 농도가 낮았거나 물질 특성에 따른 분해 (DEHA, ATBC)가 반영된 결과라고 판단된다.²⁶⁻²⁹⁾

3.3. 실내 바닥먼지 내 DEHP, DINP, DOTP의 연도별 변화

본 연구에서 검출 빈도 및 농도 수준이 높게 확인된 주요 프탈레이트류인 DEHP, DINP와 대체 가소제인 DOTP의 실내 바닥먼지 내 연도별 검출 농도 변화 및 특성을 확인하고자 하였다. 본 연구에 사용된 대상 시료는 2015년 11월 부터 2019년 4월까지 채취된 시료로, 2015년과 2019년의 경우 채취된 일수가 그 해를 대표한다고 판단하기 어려워 2015~2016년도 (2015. 11~2016. 12, n = 887), 2017년도 (2017. 1~2017. 12, n = 524), 2018~2019년도 (2018. 1~2019.1, n = 229)로 나누어 크게 세가지 시기로 비교하였다.

2015~2016년에 채취된 887개의 실내 바닥 먼지 중 DEHP, DOTP, DINP의 평균 농도는 각각 2026.8 mg/kg, 1418 mg/kg, 619 mg/kg이었고, 정량 한계 이상 검출 건 중 50% 이상이 100 mg/kg 이상이었다 (Figure 2). 2017년도에 채취된 524개의 실내 바닥먼지 중 DEHP, DOTP, DINP의 평균 농도는 각각 1335.8 mg/kg, 1375.2 mg/kg, 455.4 mg/kg이었고, 정량 한계 이상 검출 건 중 50% 이상이 100 mg/kg 이상이었다 (Figure 2). 2015~2016년과 비교하면 DEHP, DINP의 실내 바닥먼지 중 평균 농도는 각각 34%, 27% 감소되는 것이 확인되었으며, DOTP의 경우, 대체적으로 유사한 수준이었다. 2018~2019년도에 채취된 229개의 실내 바닥먼지 중 DEHP, DOTP, DINP의 평균 농도는 각각 1055.3 mg/kg, 1835.3 mg/kg,

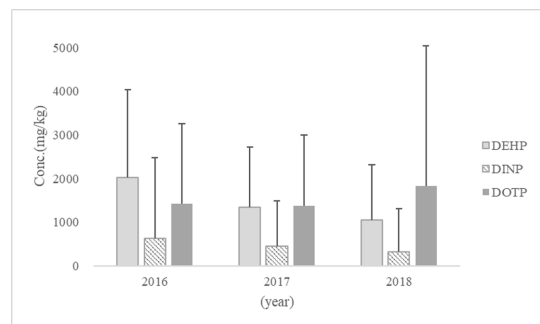


Fig. 2. Changes in the phthalates contents in house dust between 2016 and 2018.

325.1 mg/kg이었고 정량 한계 이상 검출 건 중 50% 이상이 100 mg/kg 이상으로 확인되었다 (Figure 2). 2018~2019년의 DEHP, DINP 평균 농도 또한 2015~2016년 대비 모두 48% 감소하였고 2017년 대비 각각 21%, 29% 감소하는 경향을 보였다. 그러나, DOTP의 경우 2018~2019년에 30% 이상 실내 바닥먼지 내 평균 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

DEHP, DINP는 EU REACH와 우리나라 어린이제품안전특별법에 따라 2015년부터 엄격하게 제한되기 시작하였다. 특히 장난감, 아동용품 등 특정 소비재에 DEHP, DINP 등 6종 프탈레이트 총 함량이 0.1%를 초과할 수 없도록 제한하는 규정이 적용되었다. DINP는 특히 미국 소비자제품안전위원회 (CPCS)가 DINP 등 5종의 프탈레이트에 대해 영구적 또는 임시 제한 규정을 도입하였고 2018~2019년에 본격적으로 시행되었다. 이러한 국내외적 프탈레이트류의 사용 제한이 본 연구에서 분석한 연도별 DEHP, DINP의 평균 농도 비교에서, 2015년부터 2019년까지 급격하게 감소하는 경향을 나타낸 것에 대한 한가지 원인이라 생각해 볼 수 있다. 반면 DOTP의 경우 DEHP, DINP와 화학적 특성이 매우 유사하여 두 물질의 대체제로 사용되고 있기 때문에, 연도별 평균농도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 이러한 결과로 미루어 보아 본 연구에서 분석된 실내 바닥먼지 내 프탈레이트류의 농도 결과는 실내에서 사용하는 제품의 생산 원료 등 해당 물질의 화학적 특성에 기인한다는 노출 특성을 재확인할 수 있었다.

DEHP, DINP의 경우 평균 농도는 낮아지고 있으나, 두 물질 모두 1000 mg/kg을 초과하는 높은 수준이며 일반적으로 어른보다 실내활동량이 많은 어린이의 행동 특성을 고려해볼 때, 많은 양의 프탈레이트가 어린이에게 직간접적으로 노출될 수 있는 가능성이 높다.^{7,8,9, 10,19,23)} 또한 DOTP와 같은 대체 가소제류는 향후 기존 프탈레이트류의 규제 영향으로 그 농도가 점차 증가할 것이라 예상되며 이에 따라 노출량도 함께 증가할 것이라 판단된다.²³⁾ 따라서 대체가소제의 노출에 따른 명확한 건강영향 파악을 위해서는, 향후 DOTP와 같은 대체제의 위해성에 대한 다양한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.²⁴⁾

4. 결 론

프탈레이트류는 많은 소비재 제품에서 가소제로 널리 사용되어, 특히 실내 바닥먼지를 포함한 실내 환경 전반에 광범위하게 존재하게 되었다. 프탈레이트류 노출에 의

한 건강에 대한 우려가 증가함에 따라, 이러한 물질을 대체하기 위해 대체 가소제의 사용이 점점 증가하였다. 이들 화합물에 대한 모니터링과 인체 노출 평가는 잠재적인 위해성을 이해하는 데 있어 매우 중요하다. 따라서 본 연구는 2015년~2019년 채취된 실내 바닥먼지 1,640개를 대상으로 프탈레이트류 및 대체 가소제류의 시험방법을 확립하고 실내 바닥먼지 중 대상물질에 모니터링을 수행하였다.

1,640개의 실내 바닥먼지를 대상으로 실내 바닥먼지 중 13종의 프탈레이트류 및 5종의 대체 가소제류에 대한 모니터링 결과, 실내 바닥먼지 시료에서 DEHP, DINP, DOTP가 모두 100% 검출률을 보였으며, 평균 농도는 각각 1670.3 mg/kg, 525.7 mg/kg, 1462.6 mg/kg으로 매우 높게 확인되었다. 이는 국내외 선행 연구 결과와도 유사한 수준이었다. 이는 프탈레이트류가 SVOCs에 해당하며, DEHP나 DINP와 같은 고분자량 프탈레이트는 증기압이 낮아 실내 공기 중보다는 바닥먼지에 흡착된 형태로 존재할 가능성이 높기 때문에 실내 바닥먼지에서 높은 농도로 검출되는 경향을 보이는 것으로 판단되었다.

시료채취 시점에 따라 3개의 시기로(2015~2016년, 2017년, 2018~2019년)으로 구분하고 년도에 따른 실내 바닥먼지 중 DEHP, DINP, DOTP의 변화를 확인한 결과, DEHP, DINP의 경우 시간에 따라 실내 바닥먼지 중 평균 농도가 약 50% 수준으로 감소되는 양상이, 반대로 DOTP는 약 30% 증가하는 양상을 확인된다. 이 결과는 프탈레이트류에 대한 전 세계적인 규제 강화로 인해 기존의 프탈레이트류의 사용은 감소되고 있으나 DOTP, DEHA, ATBC, DINCH 등 다양한 대체 가소제들이 사용되고 있는 경향을 입증해 준다. 이는 프탈레이트 규제의 효과성을 간접적으로 보여주지만, 대체 가소제에 대한 지속적인 모니터링 및 안전성 검증의 필요성을 시사한다. 2036년까지 진행되는 ‘어린이 환경보건 출생코호트’ 사업 진행간 누적되는 연구결과 자료와 함께 본 연구에서 분석된 1,640개 바닥먼지 시료의 정보를 결합하여 국내 지역 및 계절적 구분을 통한 고찰이 가능할 것으로 판단된다.

프탈레이트는 내분비계 교란 물질로 생식, 신경, 발달에 유해한 영향을 미치며 남성 생식기계 이상, 정자 수 감소, 성조숙증 유발, 신경발달 지연, 천식, 조산 등 다양한 건강 문제와 연관되어 있다. 우리나라는 현재 어린이제품안전특별법에서 DEHP, DINP 등 6종의 프탈레이트의 사용을 제한하고 있고 환경보건법에 따라 7종의 프탈레이트류 총 함량이 규정되어 있다. 그러나 그 외 프탈레이트

류 및 대체 가소제류에 대한 구체적인 관리 기준은 아직 미설정되어 있다. 프탈레이트류의 규제는 아직 독성에 대한 정보가 미비하고 일부 내분비계 교란 등의 잠재적인 유해성을 가질 수 있는 대체 가소제류의 “유감스러운 대체 (Regrettable Substitution) 현상”으로 이어질 수 있다는 우려가 제기된다.³⁰⁾

결론적으로 본 연구는 여전이 사용률이 높은 기존 프탈레이트류의 지속적인 관리와 함께 대체 가소제류의 사용에 대한 모니터링과 유해성 및 위해성 연구가 필요하다는 것을 시사하며, 연구를 통해 산출된 1,640개의 프탈레이트류 및 대체 가소제류의 분석결과를 통해 향후 어린이 노출량 및 위해도 평가 등의 연구의 기초자료 활용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 위해성이 높은 특정 프탈레이트류 및 대체 가소제에 대한 제한을 어린이 제품뿐만 아니라 개인 위생용품, 건축 자재, 식품 접촉 재료 등 다른 소비재로의 확대가 필요함을 제안한다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다 (NIER-2023-04-00-002). 또한 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생활화학제품 안전관리 기술개발사업 (No. 2020002970002)의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. M. Holland, “Socio-economic assessment of phthalates”, **2018**, *OECD Environment Working Paper*, 133, 0_1-90.
2. C. Sonne, C. Xia, P. Dadvand, A. C. Targino and S. S. Lam, “Indoor volatile and semi-volatile organic toxic compounds: Need for global action”, **2022**, *Journal of Building Engineering*, 62, 105344.
3. 김웅일, 계명찬, “프탈레이트의 유해성과 대체재 현황: 소고”, **2017**, *한국환경생물학회지*, 35(1), 21-36.
4. 이인혜, 나진성, 지경희, “어린이제품 내 프탈레이트류 및 대체제의 규제와 독성자료에 대한 연구”, **2021**, *한국환경보건학회지*, 47(1), 1-19.
5. A. Qadeer, K. L. Kirsten, Z. Ajmal, X. Jiang and X. Zhao, “Alternative plasticizers as emerging global environmental and health threat: Another regrettable substitution?”, **2022**, *Environmental Science & Technology*, 56(3), 1482-1488.
6. Y. Liang, C. Bi, X. Wang and Y. Xu, “A general mechanistic model for predicting the fate and transport of

- phthalates in indoor environments”, **2019**, *International Journal of Indoor Environment and Health*, 29(1), 55-69.
7. J. C. Little, C. J. Weschler, W. W. Nazaroff, Z. Liu and E. A. Cohen Hubal, “Rapid methods to estimate potential exposure to semivolatile organic compounds in the indoor environment”, **2012**, *Environmental Science & Technology*, 46(20), 11171-11178.
8. 전정인, 이해원, 이승현, 이정일, 이철민, “살내환경 중 집먼지 및 유기필름에서 기인한 프탈레이트 노출평가”, **2022**, *한국환경보건학회지*, 48(2), 75-85.
9. 윤효정, 이병천, 이병우, 박경화, 김필제, 유승도 “생체모니터링 자료를 활용한 위해성평가 기법 연구 (I)”, **2018**, 국립환경과학원.
10. 박성수, 구용의, 황명실, 전우진, 김은정, 서민경, 이승찬, 백소원, “유해물질 인체 통합위해성평가 연구(프탈레이트류)”, **2019**, 식품의약품안전평가원.
11. S. Jeon, K. T. Kim and K. Choi, “Migration of DEHP and DINP into dust from PVC flooring products at different surface temperatures”, **2016**, *Science of the Total Environment*, 547, 441-446.
12. G. Luongo and C. Östman, “Organophosphate and phthalate esters in settled dust from apartment buildings in Stockholm”, **2016**, *Indoor air*, 26(3), 414-425.
13. Y. Zhao, Y. Sun, Q. Zhang, Q. Zhang and J. Hou, “A method for evaluating indoor phthalate exposure levels in collected dust”, **2021**, *MethodsX*, 8, 101187.
14. C. Kubwabo, P. E. Rasmussen, X. Fan, I. Kosarac, F. Wu1, A. Zidek and S. L. Kuchta, “Analysis of selected phthalates in Canadian indoor dust collected using household vacuum and standardized sampling techniques”, **2013**, *Indoor Air*, 23(6), 506-514.
15. K. Promtes, O. Kaewboonchoo, T. Kawai, K. Miyashita, B. Panyapinyopol, S. Kwonpongsagoon and S. Takemura, “Human exposure to phthalates from house dust in Bangkok, Thailand”, **2019**, *Journal of Environmental Science and Health*, 54(13), 1269-1276.
16. D. Kim, J. Y. Park, D. H. Lee, J. E. Lim, H. B. Moon, S. Kim and K. Lee, “Simultaneous assessment of organophosphate flame retardants, plasticizers, trace metals, and house dust mite allergens in settled house dust”, **2022**, *Indoor air*, 32(7), 1-15.
17. B. Subedi, K. D. Sullivan and B. Dhungana, “Phthalate and non-phthalate plasticizers in indoor dust from child-care facilities, salons, and homes across the USA”, **2017**, *Environmental Pollution*, 230, 701-708.
18. Y. Guo and K. Kannan, “Comparative assessment of human exposure to phthalate esters from house dust in China and the United States”, **2011**, *Environmental Science & Technology*, 45(8), 3788-3794.

19. T. M. Tran, H. T. Le, T. B. Minh and K. Kannan, "Occurrence of phthalate diesters in indoor air from several Northern cities in Vietnam, and its implication for human exposure", **2017**, *Science of the Total Environment*, 601, 1695-1701.
20. D. Y. Kim, S. H. Chun, Y. Jung, D. F. M. S. Mohamed, H. S. Kim, D. Y. Kang, J. W. An, S. Y. Park, H. W. Kwon and J. H. Kwon, "Phthalate plasticizers in children's products and estimation of exposure: importance of migration rate", **2022**, *International Journal of Environmental Research*, 17(22), 8582.
21. 심기태, 송기봉, 김혁, 김일규, 이채홍, 박소연, 석광설, 김동훈, "어린이용품 중 프탈레이트류 확률론적 노출평가연구", **2018**, *환경분석과 독성보건*, 21(1), 41-51.
22. D. F. M. Mohamed, A. Tarafdar, S. Y. Lee, H. B. Oh and J. H. Kwon, "Assessment of biodegradation and toxicity of alternative plasticizer di(2-ethylhexyl) terephthalate: Impacts on microbial biofilms, metabolism, and reactive oxygen species-mediated stress response", **2024**, *Environmental Pollution*, 355, 124217.
23. N. Shinohara, T. Oguri, M. Takagi, J. Ueyama and T. Isobe, "Evaluating the risk of phthalate and non-phthalate plasticizers in dust samples from 100 Japanese houses", **2024**, *Environment International*, 183, 108399.
24. Y. Aoki, A. Tokai, N. Kojima and S. Hanai, "Relative risk assessment of Bis (2-ethylhexyl) phthalate and alternative plasticizers: Application of consumer exposure tools and damage functions", **2022**, *Environmental Monitoring and Contaminants Research*, 2, 35-44.
25. N. Ali, N. A. Alhakamy, I. M. I. Ismail, E. Nazar, A. S. Summan, S. A. M. A. S. Eqani and G. Malarvanan, "Exposure to phthalate and organophosphate esters via indoor dust and PM10 is a cause of concern for the exposed Saudi population", **2021**, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 2125.
26. CPSC (U.S. Consumer Product Safety Commission), CPSC Staff Statement on University of Cincinnati Report "Toxicity Review for Acetyl Tri-n-butyl Citrate (ATBC)", <https://www.cpsc.gov/s3fs-public/Toxicity%20Review%20of%20ATBC.pdf>.
27. CPSC (U.S. Consumer Product Safety Commission), CPSC Staff Statement on University of Cincinnati Report "Toxicity Review for Bis(2-ethylhexyl) Adipate (DEHA)", <https://www.cpsc.gov/s3fs-public/Toxicity%20Review%20of%20DEHA.pdf>.
28. CPSC (U.S. Consumer Product Safety Commission), CPSC Staff Statement on University of Cincinnati Report "Toxicity Review for Triocetyltrimellitate (TOTM)", <https://www.cpsc.gov/s3fs-public/Toxicity%20Review%20of%20TOTM.pdf>.
29. CPSC (U.S. Consumer Product Safety Commission), "Review of Exposure and Toxicity Data for Phthalate Substitutes", <https://www.cpsc.gov/s3fs-public/phthalsub.pdf>.
30. QADEER, Abdul, et al. Alternative plasticizers as emerging global environmental and health threat: another regrettable substitution?. *Environmental science & technology*, 2022, 56.3: 1482-1488