

모의 실험주택 모니터링 결과를 활용한 실내공기 및 바닥먼지 중 Di(2-ethyl-hexyl) phthalate (DEHP)의 이론적 총량 비율 산출

천사호^{1,2} , 이가원² , 김승중² , 정승표² , 강다영² , 김기태^{1,3*} 

¹서울과학기술대학교 에너지환경공학과, ²(재)FITI시험연구원, ³서울과학기술대학교 환경공학과

Calculation of the Theoretical Total Amount Ratio of Di(2-ethyl-hexyl) Phthalate in Indoor Air and Floor Dust in a Test House

SaHo Chun^{1,2}, Khawon Lee², SeungJung Kim², SeungPyo Jung², DaYoung Kang², and Ki-Tae Kim^{1,3*}

¹Department of Energy and Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, ²FITI Testing and Research Institute,

³Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

Background: Human exposure to phthalates in indoor environments occurs via dermal absorption, oral ingestion of indoor dust, and inhalation of indoor air. However, systematic studies to investigate the exposure rate to phthalates among the three exposure routes in indoor environments are currently limited.

Objectives: A theoretical exposure ratio between inhalation and oral exposure was calculated based on the total amount of di(2-ethyl-hexyl) phthalate (DEHP) emitted into indoor air and deposited into floor dust in a test house.

Methods: Flooring and wallpaper containing DEHP were installed in a test house and the concentration of DEHP in both indoor air and floor dust were monitored for five months. Based on the measured DEHP concentrations, the theoretical total amount ratio of DEHP that could be exposed through inhalation and oral ingestion was calculated.

Results: Considering the period of operation in the test house, the theoretical total amount of DEHP through inhalation and oral ingestion exposures in the entire test house space was calculated to be 0.014 mg and 5.5 mg, respectively. The exposure ratio of the two routes between inhalation and oral exposure corresponding to the total DEHP amount in flooring and wallpaper was $6.0 \times 10^{-7}\%$ and $2.3 \times 10^{-4}\%$, indicating that theoretical oral exposure to DEHP is approximately 380 times higher than inhalation.

Conclusions: Monitoring results from a test house has shown that oral exposure is the main exposure route for DEHP in indoor environments. The experimental design employed in this study and theoretical exposure ratio obtained can be applied to investigate actual exposure to DEHP and to determine the exposure characteristics of various types of semi-volatile organic compounds.

Key words: Indoor air, floor dust, phthalates, di(2-ethyl-hexyl) phthalate (DEHP), test house

Received October 10, 2023

Revised November 2, 2023

Accepted November 6, 2023

Highlights:

- A test house with flooring and wallpaper containing DEHP was installed.
- The theoretical total amount of DEHP in indoor air and floor dust was calculated to be 0.014 mg and 5.5 mg, respectively.
- The exposure ratio of the total DEHP amount in flooring and wallpaper was calculated to be $6.0 \times 10^{-7}\%$ for inhalation and $2.3 \times 10^{-4}\%$ for oral exposure, respectively.
- The orally exposed amount of DEHP through floor dust is approximately 380 times higher than the inhalation.

*Corresponding author:

Department of Energy and Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowan-gu, Seoul 01811, Republic of Korea

Tel: +82-2-970-6642

Fax: +82-2-970-5576

E-mail: ktkim@seoultech.ac.kr

I. 서 론

프탈레이트는 2015년 기준 연간 전 세계 생산량이 550만 톤 이상인 High Production Volume Chemicals 중 하나로 합성수지 제품 제조과정에서 성형 및 가공의 목적으로 첨가되는 화학물질(원료)이다.¹⁾ 프탈레이트는 알려진 유해성(내분비계 장애, 발암성 등)으로 인하여 2000년대 말부터 합성수지 재질의 공산품(완구, 건축자재 등에서 0.1% (w/w)로 함량 기준이 설정되어 관리되고 있다.^{2,3)} 그러나 안전성 조사 및 많은 연구들에서 관리기준 이상의 검출사례가 높은 빈도로 보고되고 있어 프탈레이트의 노출원을 확인하고, 노출수준을 평가하는 일은 프탈레이트 노출 관리 측면에서 매우 중요하다.⁴⁻⁶⁾

여러 연구들에서 Di-2-ethylhexyl phthalate (DEHP), Di-n-octylphthalate (DNOP), Diisononyl phthalate (DINP) 등과 같은 프탈레이트 함유 가능성이 있는 다양한 합성수지 제품의 사용이 실내공간에서의 프탈레이트의 노출수준을 결정하는 주요 원인임이 알려져 있다.⁴⁻⁷⁾ 바이오모니터링 연구들에서도 실내공간 내 머무는 시간이 많은 현대생활 특성이 반영되어 일정 수준 농도 이상의 다양한 프탈레이트가 체내에 존재한다고 보고하고 있다.⁷⁻⁹⁾ 특히, 실내공간의 필수적인 구성요소인 바닥재 및 벽지는 제품 내 가소성을 부여하기 위하여 필수적으로 DEHP, DINP와 같은 프탈레이트가 함유되어야 하므로 프탈레이트의 주요 노출원이 된다.^{7,10-12)} 실내공간 내 바닥재 및 벽지 내 함유된 프탈레이트는 피부접촉을 통한 노출 그리고 프탈레이트 방출에 따른 실내공기 흡입을 통해 주로 노출되고 있다.¹³⁾ 실내공기 중으로 방출된 프탈레이트는 낮은 증기압으로 공기 중 입자상 물질에 쉽게 흡착되며, 입자상 물질은 실내공간의 바닥으로 낙하할 수 있어, 낙하된 먼지를 통한 경구노출 또한 주요한 노출경로이다. 바닥면지를 통한 경구노출은 영아, 유아와 같이 기어 다니거나 손을 빠는 등의 행동을 보이는 특정 인구집단에서 높은 노출기여율을 보인다.^{6,13)}

실내공간에서의 경로별 프탈레이트의 노출 특성을 평가하기 위해 다양한 선행연구들이 수행되었다. 프탈레이트의 흡입 노출의 경우, 마이크로 챔버 등을 활용하여 실내 공기 중 프탈레이트의 방출량을 확인하거나, 실내공간 내 공기 시료 채취의 어려움으로 인하여 실내공간 내 먼지 중 프탈레이트 농도를 기반으로 모델식을 활용하여 공기 중 프탈레이트 농도를 추정하였다.^{10,13,14)} 이들 연구들의 공통적인 결과는 실내공간 내 프탈레이트의 흡입을 통한 노출량은 다른 노출경로에 비하여 매우 낮으며, 공기 중으로 방출된 프탈레이트는 먼지 등에 흡착되어 경구 노출량을 증가시키는 원인이 된다는 것이다.¹³⁾ 그리고 실내공간 중 프탈레이트의 바닥면지를 통한 경구노출과 관련하여서는 실제 실내공간(가정집, 어린이집 등) 내 바닥면지를 채취 및 분석하여 프탈레이트의 노출량을 확인하는 연구들과 함께,¹⁴⁻¹⁶⁾ 실내공간을 가정한 챔버 등을 활용하여 바닥재 중 프

탈레이트의 바닥면지로의 전이를 특징화한 연구들이 보고되고 있다.^{11,12)} 그러나 실내공간의 프탈레이트는 함유 제품의 사용행태, 사용기간 등에 영향을 받아 경로 별로 동시에 노출될 수 있음에도 대부분의 연구들이 개별 노출경로만을 고려하였다. 또한 하나의 노출원으로부터 주로 고려될 수 있는 하나의 노출경로로부터 다른 노출경로로의 노출량을 추정하기 위해 모델식을 활용한 연구가 존재하지만¹³⁾ 장기간 실측 결과 기반으로 동일한 프탈레이트 노출원으로부터 흡입, 경구 등의 노출 경로를 모두 고려한 프탈레이트의 총 노출량 및 노출원 대비 노출비율을 확인한 연구는 거의 없다. 이는 다양한 연구결과를 통한 비교는 가능하지만 실내공간에서의 프탈레이트 노출에서 어떤 노출원, 어떤 노출경로가 상대적으로 중요한지를 파악하는데 한계가 존재함을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 다양한 종류의 프탈레이트류 중 건축자재 생산의 첨가제로 가장 광범위하게 사용되고 있는 DEHP를 대상으로 노출 경로별 노출량을 확인하고자 하였다. 이를 위해 DEHP가 함유된 바닥재 및 벽지를 주요 노출원으로 가정하여 모의 실험주택에 시공하였고 약 5개월간 실험주택의 실내공기와 바닥면지에서의 DEHP 농도를 실측하였다. 그리고 실측 결과를 바탕으로 흡입노출경로와 경구노출경로로의 DEHP의 이론적 노출 총량을 산출하고, 노출원인 바닥재 및 벽지의 DEHP 이론적 함량과 비교하여 각 경로별 비율을 정량적으로 산출하였다.

II. 재료 및 방법

1. 모의 실험주택 내 DEHP가 함유된 바닥재 및 벽지의 시공 및 운영

세종시 소재의 LH주택 성능평가센터에서 운영하는 모의 실험주택을 임대하여, DEHP가 함유된 바닥재 및 벽지를 시공한 후, 약 5개월간(2022. 6. 27~2022. 11. 22, 149일) 실내 공기 및 바닥면지 중 DEHP를 모니터링하였다. 국내 바닥재 및 벽지의 관리 기준은 대부분 DEHP의 함량 기준으로 0.1%로 설정^{17,18)}되어 있어, DEHP가 함유된 자재를 수급하기 어려웠으나, 수출 목적으로 DEHP가 의도적으로 함유되어 제조된 바닥재 (FL-1 및 FL-2)와 사전 모니터링 시 DEHP의 함유가 확인된 벽지(W-1) 정보를 확인하여 구매한 후, 모의 실험주택에 시공하였다. 실험주택의 전체적인 모식도는 Fig. 1에 나타나 있다.

임대한 모의 실험주택은 거실, 주방 및 방 3개(침실 1, 침실 2, 침실 3)가 포함된 일반적인 아파트형 주택의 구조였으며, 각 공간의 부피는 거실 및 주방은 56.0 m³, 침실 1, 2, 3은 각각 18.3 m³, 25.5 m³, 14.1 m³였다. 각 공간에는 DEHP가 함유된 동일한 벽지를 시공하였다. 다만, 바닥재의 경우, 거실 및 주방 그리고 2개 방(침실 2, 침실 3)에는 동일한 바닥재를 시공하였으나, 1개 방(침실 1)에는 DEHP 함유 농도가 다른 타 제조사의

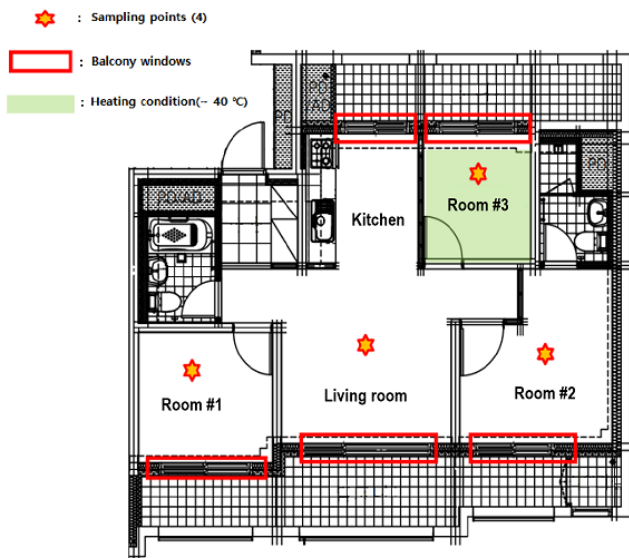


Fig. 1. Flooring and wallpaper construction diagram

바닥재를 시공하였다. 거실 및 주방의 자재 시공면적은 FL-1 20.9 m², W-1 24.3 m², 침실 1은 FL-2 7.1 m², W-1 15.5 m², 침실 2는 FL-1 10.4 m², W-1 17.5 m², 침실 3은 FL-1 6.0 m², W-1 15.3 m²이었다. 모의 실험주택은 별도의 냉난방 시설이 구비되어 있지 않아 온도에 따른 영향을 확인하기 위하여 침실 3의 경우, 난방 장비를 별도로 운영하여 방의 온도를 40°C 이상으로 유지한 상태로 실내공기 및 바닥면적 중 DEHP 농도를 측정할 후, 동일한 자재가 시공된 침실 2와 비교하였다.

2. 바닥재 및 벽지 중 DEHP 함량 분석

모의 실험주택 내 시공한 바닥재 및 벽지의 DEHP 함량분석은 KS M 1991 : 2016, 고분자 재료 중의 프탈레이트 분석 방법을 적용하였다.¹⁹⁾ 이 때 바닥재는 전체시료와 관련 부속서 내 상층부의 기준(표면코팅층, 투명필름층, 인쇄층 및 글라스파이버 함침층까지)에 따라 상층부에 대한 함량분석을 진행하였다.¹⁷⁾ 각 시료를 약 2×2 mm로 잘게 자른 후 약 0.3 g을 40 mL 유리 바이알에 넣은 후 약 10 mL의 Tetrahydrofuran을 넣은 후 30분간 초음파 추출하여 고분자를 용해시켰다. 이 때 용해되지 않은 시료의 경우, 30분간 추가로 초음파 처리를 진행하였다. 20 mL Acetonitrile을 넣어 고분자를 석출하여 분리한 후, 상분리를 위하여 30분간 방치하였다. 상등액을 0.45 μm PTFE 재질의 시린지 필터로 여과한 후 Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS, QP2020, SHIMADZU, Japan)로 분석하였다. DEHP 분석을 위하여 컬럼은 DB-35MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm)를 사용하였으며, 시료 주입구 온도는 270°C로 유지, 오븐 조건은 100°C에서 2분간 유지한 후 분당 15°C씩 340°C까지 승온시켰으며, 이후 5분간 340°C가 유지되는 조건

을 적용하였다. 질량분석기는 EI (Electron Ionization) 모드에서 70 eV로 이온화를 진행하였으며, 스캔 모드에서 질량 범위는 75~550 m/z, DEHP의 정성 및 정량이온은 149 m/z, 167 m/z, 279 m/z로 하였다. 실제 채취된 시료 분석 전, 상기 시험 절차의 유효성 확인을 위하여 정도관리를 수행하였다. 정도관리 결과, 검정곡선 검증에서 DEHP의 결정계수(R²)는 0.9993로, 정확도는 100.2%, 정밀도는 2.9%, 방법검출한계는 1.6 mg/kg, 정량한계는 5.0 mg/kg로 산출되었다.

함량분석 결과를 토대로 모의 실험주택 각 공간에서 이론적으로 노출 가능한 DEHP 총량(Ams) (g)을 아래 식(1)을 이용해 산출하였다.

$$Am_s = (C_{DEHP(F)} \times Ar \times M_{a(f)} \times Mr_{upper}) + (C_{DEHP(w)} \times Ar \times M_{a(w)}) \quad (1)$$

여기서, Am_s 는 각 공간에서 이론적으로 노출 가능한 DEHP 총량(g), $C_{DEHP(F)}$ 는 바닥재 중 상부층의 DEHP의 함량(mg/kg), $C_{DEHP(w)}$ 는 벽지의 DEHP의 함량(mg/kg), Ar 은 각 공간의 자재별 시공면적(m²), $M_{a(f)}$ 은 바닥재의 단위면적 당 질량(kg/m²), $M_{a(w)}$ 은 벽지의 단위면적 당 질량(kg/m²) 그리고 Mr_{upper} 는 바닥재 상부층의 질량비율(%)이다.

3. 실내공기 중 DEHP 채취 및 분석

실내공기 중 DEHP 채취는 실내공기질 공정시험기준 및 ISO 16000-33에서 제시된 절차^{20,21)}를 참고하여 채취하였으며, 바닥재 및 벽지 시공 전 각 공간별 DEHP 농도는 검출한계인 60 ng/m³ 미만으로 확인되었다. 바닥재 및 벽지의 시공이 완료 시점 이후 이틀간 연속 채취하였다. 이후 일주일~이주일 간격으로 총 16회 실내공기 중 DEHP 채취를 진행하였다. 실내공기질 공정시험기준의 채취절차에 따라 채취 전 창문 및 실내 출입문을 개방하여 30분간 환기시킨 후, 다시 창문 및 실내 출입문을 닫아 5시간 동안 밀폐시켰다. 이후 시료채취펌프(Mini pump VOCs Sampler, SIBATA)에 Tenax-TA 흡착관(60/80 mesh, O.D.×L 1/4 in.×3 1/2 in., Stainless steel TD tube, Supelco)을 연결한 후, 100 mL/min의 유속으로 약 11시간 동안 70 L를 흡착 채취하였다. 채취한 Tenax-TA 흡착관은 채취 공간별로 분류하여 아이스박스에 넣은 뒤 시험실로 이동하였으며, 분석 전 4°C 조건에서 냉장 보관하였다.

위의 절차에 따라 채취된 Tenax-TA 흡착관 중 DEHP 분석은 ISO 16000-33에서 제시된 절차를 참고하여 Auto thermal desorber (ATD, PerkinElmer Turbomatrix 650)와 GC/MS (GC690/MS-SQ8T, PerkinElmer, MA, USA)를 활용하여 분석하였다.²¹⁾ ATD 분석 조건으로는 흡착관을 탈착 온도 250°C에서 15분간 탈착하였으며, 이 때, 탈착 가스의 유속은 40 mL/min이었다. 냉각 트랩 온도는 -30°C에서 280°C까지 승온시켜 분석 물질을 탈착시키고, GC로 이어지는 수송 라인의 온

도는 250°C로 유지되었다. GC의 분석 시, DB-5MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm) 컬럼을 사용하였으며 시료 주입구 온도는 250°C로 유지되었다. 오븐 조건은 40°C에서 1분간 유지한 후 분당 20°C씩 200°C까지 승온시키고, 이후 분당 5°C씩 280°C까지 승온시켜 4분간 유지한 뒤, 분당 2.5°C씩 300°C까지 승온시켜 3분간 유지하였다. MS는 EI 모드에서 70 eV로 이온화를 진행하였으며, 스캔 모드에서 질량 범위는 35~550 m/z이며, DEHP의 정량 및 정성 이온은 149 m/z, 167 m/z, 279 m/z로 설정하였다. 실제 채취된 시료 분석 이전에 절차의 유효성 확인을 위해 정도관리를 수행하였다. 정도관리 결과, 결정계수(R²)는 0.9997로 확인되었으며, 검정곡선의 중간농도인 100 ng DEHP가 함침된 흡착관을 7회 분석하여 정확도와 정밀도를 구하였고, 정확도는 95.6%, 정밀도는 2.3%를 나타냈다. 방법검출한계와 정량한계를 산출하기 위해 25 ng DEHP가 함침된 흡착관을 7회 분석하였고, 시료 채취 부피인 70 L를 이용하여 농도를 환산하였을 때, 방법검출한계는 60 ng/m³, 정량한계는 190 ng/m³으로 산출되었다.

실내공기 중 DEHP 분석결과를 토대로 흡입경로를 통하여 이론적으로 노출 가능한 DEHP 총량($Am_{inhalation}$) (g)은 아래 식(2)을 이용하여 산출하였다.

$$Am_{inhalation} = C_{DEHP(air)} \times V \quad (2)$$

여기서, $Am_{inhalation}$ 는 각 공간에서 흡입경로를 통하여 이론적으로 노출 가능한 DEHP 총량(g), $C_{DEHP(air)}$ 는 16회 분석된 공기 중 DEHP의 평균 농도(ng/m³), V 는 각 공간의 부피(m³)이다.

4. 바닥먼지 채취 및 DEHP 분석

모의 실험주택의 경우, 상주인력이 없기 때문에 일반적인 주거시설보다 발생하는 바닥먼지가 적다고 판단하였다. 따라서 바닥먼지 채취는 시공이 완료된 후, 충분한 바닥먼지가 각 방별로 축적될 수 있도록 약 30일이 지난 시점에서 최초로 바닥먼지 채취를 수행하였으며, 이 후에 약 30일 마다 각 방 및 거실의 바닥먼지를 채취하였다. 바닥먼지는 모의 실험주택 운영 기간 동안 각 공간별로 총 5회 채취하였다. 바닥먼지 채취는 ISO 16000-33, Annex I 및 ASTM D5438-17에서 제시된 절차를 참고하여 진공청소기를 이용하였다.^{21,22} 다만, 교차오염 방지를 위하여 진공청소기 채취관을 스테인리스 재질로 제작하여 시료를 채취하는 동안 합성수지와 접촉을 배제하고자 하였다. 그리고 채취관 중간에 80 μm의 공극을 갖는 나일론 포집백을 설치, 포집백에 먼지가 모일 수 있도록 하였다. 채취된 먼지는 교차오염 방지를 위하여 나일론 포집백을 알루미늄 포일로 포장한 후, 분석 전까지 4°C에 보관하였다.

각 공간에서 채취된 바닥먼지는 선행 연구사례들을 검토하여²³⁻²⁵ 분석 전 500 μm 체질을 통하여 협잡물을 제거한 후

최소 50 mg 수준의 먼지를 분리함으로써 실제 바닥먼지 중 DEHP용 분석시료를 확보하였다. 먼지 약 50 mg을 유리 바이알에 넣은 후 n-Hexane 및 Acetone을 1:1로 혼합한 용매 10 mL를 넣고 30분간 초음파 추출을 진행하였다. 3,000 rpm에서 30분간 원심분리를 통하여 상등액과 먼지를 분리한 후, 상등액을 채취하여 질소농축기를 이용하여 농축한 액을 GC-MS (QP2020, SHIMADZU, Japan)로 분석하였다. DEHP 분석을 위하여 컬럼은 DB-5MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm)를 사용하였으며, 시료주입구 온도는 270°C로 유지, 오븐조건은 100°C에서 2분간 유지한 후 분당 15°C씩 340°C까지 승온시켰으며, 340°C 이후 5분간 유지하는 조건을 적용하였다. 질량 분석기는 EI 모드에서 70 eV로 이온화를 진행하였으며, 스캔 모드에서 질량범위는 75~550 m/z, DEHP의 정성 및 정량 이온은 149 m/z, 167 m/z, 279 m/z로 하였다. 실제 채취시료 분석 전, 상기 시험절차의 유효성 확인을 위하여 정도관리를 수행하였다. 정도관리 결과, 검정곡선 검증에서 DEHP의 결정계수(R²)는 0.9994로, 정확도는 109.6%, 정밀도는 5.9%, 방법검출한계는 0.08 mg/kg 정량한계는 0.24 mg/kg으로 확인되었다.

바닥먼지 중 DEHP 분석결과를 토대로 경구경로를 통하여 이론적으로 노출 가능한 DEHP 총량(Am_{oral}) (g)을 아래 식(3)을 이용하여 산출하였다.

$$Am_{oral} = C_{DEHP(dust)} \times M_{dust} \quad (3)$$

여기서, Am_{oral} 은 각 공간에서 경구경로를 통하여 이론적으로 노출 가능한 DEHP 총량(g), $C_{DEHP(dust)}$ 는 5개월간 바닥먼지 중 DEHP의 농도의 합(mg/kg), M_{dust} 는 바닥먼지 총량(kg)이다.

일반적으로 바닥먼지의 경우 일상적인 주거환경의 바닥먼지는 환기를 통한 외부먼지가 유입되거나 실내공간에 조성된 인간의 생활환경(카펫, 섬유 등의 탈락)에서 발생된 먼지의 낙하로 인하여 발생된다. 실제 모의 실험주택 운영의 입자상 물질의 농도를 실측한 결과, 16 μg/m³ 수준으로 실내공기질 유지기준 대비 약 10배 정도 낮게 측정되었다. 이는 실험주택 운영의 한계점인 사람의 비거주, 간헐적인 환기로 인하여 입자상 물질의 발생양이 낮은 것으로 판단되었다. 따라서 실내공간의 입자상 물질은 모두 침전하여 바닥먼지가 생성된다는 가정 하에 입자상 물질의 농도는 실내공기질 관리법상 일평균 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 유지기준의 합인 150 μg/m³로 정하고, 아래 식(4)을 이용하여 M_{dust} 를 산출하였다.

$$M_{dust} = C_{pm} \times D \times V \quad (4)$$

여기서, C_{pm} 은 실내공기질 관리법상 일평균 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 유지기준의 합인 150 μg/m³, D 는 모의 실험주택 운영기간(day), V 는 각 공간의 부피(m³)이다.

III. 결과 및 고찰

1. 바닥재 및 벽지의 DEHP 함량 분석 결과 및 각 공간별 노출 가능한 DEHP의 이론적 총량

Table 1에는 바닥재 및 벽지의 DEHP 함량분석 결과를 나타내었다. 바닥재 FL-1 및 FL-2의 전체 DEHP 함량은 각각 27,000 mg/kg, 51,000 mg/kg로 확인되었으며, 벽지 W-1의 DEHP 함량은 114,000 mg/kg로 확인되었다. 그리고 바닥재 중 상부층만 분리하여 분석한 DEHP 결과는, FL-1은 12,000 mg/kg, FL-2는 27,000 mg/kg였다.

바닥재와 벽지의 DEHP 함량농도를 토대로 모의 실험주택의 각 공간별 노출 가능한 DEHP의 이론적 총량을 산출하여 Table 2에 나타내었다. 각 공간의 DEHP 총량을 산출할 때, 바닥재의 경우 전체 함량농도가 고려되어야 하나, 실험주택 운영상 한계점인 사람의 비상주로 인하여 바닥재 하부층의 직접노출의 가능성이 없고, 바닥재의 상부층에 존재하는 DEHP가 실내공기 및 바닥면지 중 DEHP의 농도를 결정할 것으로 판단하여 상부층의 DEHP 농도와 전체 바닥재 중 상부층의 질량비율(FL-1: 5.5%, FL-2: 2.4%)만을 고려하였다. 이 때, 거실 및 주방의 경우 813 g, 침실 1의 경우 490 g, 침실 2의 경우 570 g 그리고 침실 3의 경우 488 g의 DEHP가 이론적으로 노출 가능한 총량으로 계산되었다.

Table 1. Di(2-ethyl-hexyl) phthalate (DEHP) contents in flooring and wallpaper

Sample I.D	DEHP concentration (mg/kg)	
	Total	Upper layer
FL-1 (flooring)	27,000	12,000
FL-2 (flooring)	51,000	27,000
W-1 (wallpaper)	114,000	-

2. 실내공기 중 DEHP 분석 결과 및 흡입을 통한 노출 가능한 DEHP 총량

모의 실험주택 운영 기간인 약 5개월에 걸쳐 각 침실, 거실, 및 주방에서 실내공기 중 DEHP를 총 16회 채취하여 바닥재 및 벽지에서 실내공기로 방출되는 DEHP의 분석결과를 Fig. 2에 나타내었다. 분석 결과, 각 공간별(거실 및 부엌, 침실 1, 침실 2) 실내공기 중 DEHP는 시공 후 8일 째에 검출한계(60 ng/m³) 이상으로 확인되었고, 대체적으로 8~12일 사이에 최고 농도 수준을 보인 후 시간에 따라 감소하여 120일 이후 검출한계 미만으로 확인되었다. 그리고 다른 공간에 비하여 간헐적으로 온도가 약 10°C 높게 유지된 침실 3의 경우, 초기 채취 시점부터 공기 중 DEHP 농도는 455 ng/m³였으며, 검출한계 미만으로 확인되는 시점도 다른 공간에 비하여 일주일 정도 빨라, 다른 공간에 비해 온도 영향으로 빠른 방출이 일어나는 것으로 판단된다.

각 공간별 실내공기 중 DEHP 농도 패턴 해석을 위하여 DEHP의 배출원인 바닥재와 벽지의 면적 대비 해당 공간의 부피비(Area/Volume ratio)를 산출한 결과, 거실 및 주방의 부피비는 0.8, 침실 1은 1.2, 침실 2는 1.1, 침실 3은 1.5로 산출되었다. 거실 및 주방의 경우, 다른 공간에 비해 바닥재와 벽지의 면적 대비 해당 공간의 부피비가 낮기 때문에 공기 중 DEHP의 평균농도(95.1 ng/m³)가 가장 낮았던 것으로 판단된다. 그리고 동일한 자재가 시공된 침실 2와 침실 3의 공기 중 DEHP 농도 패턴 차이는 면적 대비 해당 공간의 부피비와 온도 영향으로 인해 평균 농도(침실 2: 115.7 ng/m³, 침실 3: 275.2 ng/m³) 및 실내공기 중 DEHP의 농도패턴이 다르게 나타났을 것으로 생각된다. 침실 2에 비해 침실 3의 공기 중 DEHP 농도가 높게 측정되었는데, 이는 침실 3의 실내 온도가 약 5~10°C 높았기 때문으로 추정된다. 본 연구결과와 비슷하게 선행연구에서 실내공간의 온도가 21°C에서 30°C로 높아짐에 따라 실내공기 중 DEHP 농도가 약 3배 높게 검출되었음을 보고하였다.¹¹⁾ 그리고 침실 1과 침실 2의 공간별 부피비는 큰 차이가 없어 공기 중

Table 2. Theoretical exposed total di(2-ethyl-hexyl) phthalate (DEHP) amount

Room no.	Materials	Construction area (m ²)	Mass per area for materials (kg/m ²)	DEHP concentration for materials (mg/kg)	Theoretical exposed total DEHP amount (g)*
Living room & kitchen	Flooring (FL-1)	20.9	5.139	12,000	813
	Wallpaper (w-1)	24.3	0.268	114,000	
Room #1	Flooring (FL-2)	7.1	3.601	27,000	490
	Wallpaper (w-1)	15.5	0.268	114,000	
Room #2	Flooring (FL-1)	10.4	5.139	12,000	570
	Wallpaper (w-1)	17.5	0.268	114,000	
Room #3	Flooring (FL-1)	6.0	5.139	12,000	488
	Wallpaper (w-1)	15.3	0.268	114,000	
Sum					2,361

*Considering the concentration of upper layer of the flooring and mass ratio per layers (FL-1: 5.5%, FL-2: 2.4%).

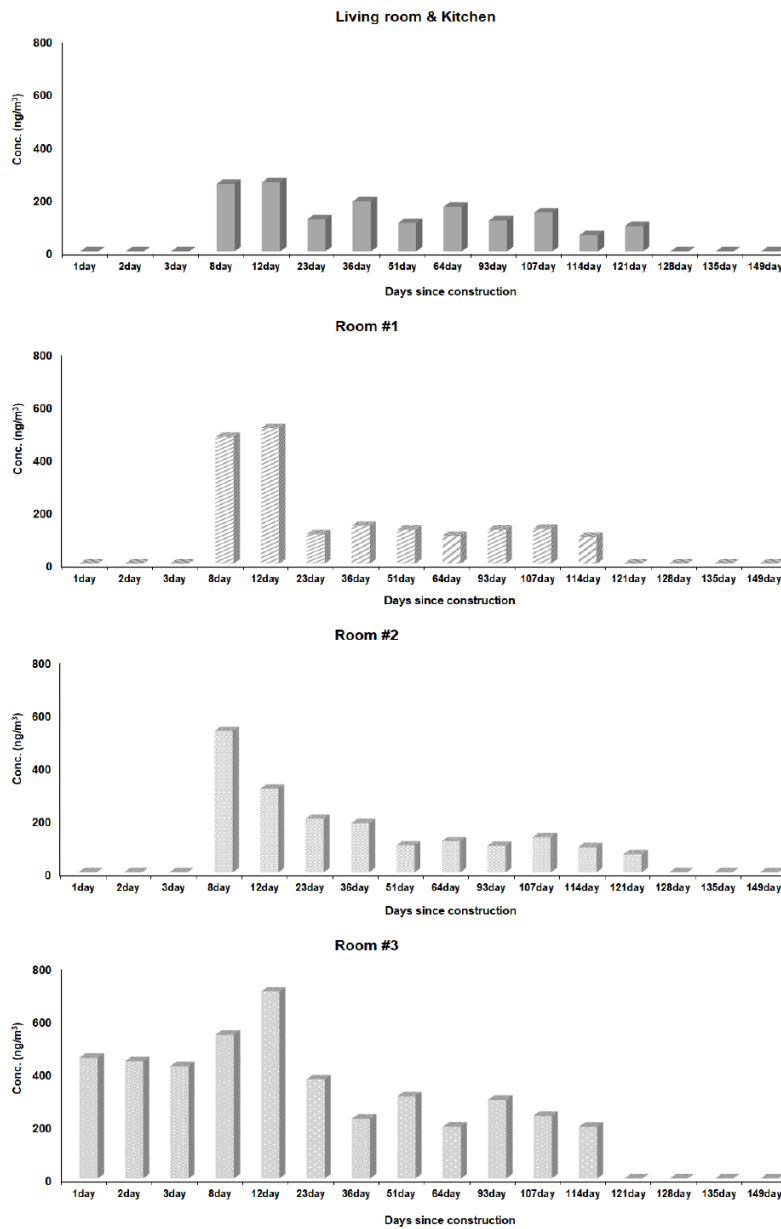


Fig. 2. Di(2-ethyl-hexyl) phthalate (DEHP) emission concentration in a test house by each indoor space (detection limit: 60 ng/m³)

DEHP의 평균농도는 유사했으나, 침실 1의 경우, 초기 단계에 높은 농도로 방출되었다가 급격하게 감소되었고, 침실 2의 경우, 최고 농도로 방출된 이후 서서히 감소되는 패턴을 보였다. 이는 시공된 자재의 특성(상층부의 구성비율, DEHP 농도, 물성 등)에서 기인된 차이라고 판단된다. 모의 실험주택 각 공간 별 실내공기 중 DEHP 농도는 시간에 따라 농도 차이는 존재하지만, 선행 연구사례와의 실내공간 중 DEHP 농도 비교를 위하여 전체 공간에서 측정된 DEHP 농도의 산술평균은 150.2 ng/m³이었다. 국내 수도권 지역의 실내 주거공간의 바닥먼지 중 DEHP

농도를 측정하였고, 측정된 농도 결과를 토대로 실내공기 중 DEHP 농도를 추정한 선행연구에서는 공기 중 DEHP 농도를 $4.10 \times 10^{-1} \sim 1.52 \times 10^4$ ng/m³ 수준(평균 51 ng/m³)으로 보고하였다.¹²⁾ 본 연구와 선행연구의 실내공간 내 DEHP 평균농도와 비교해 보면 본 연구의 결과가 약 3배 높음을 확인하였는데, 이는 먼지에서의 농도기반으로 추정된 실내공기에서의 DEHP 농도보다 실제 실내공기에 존재 가능한 DEHP 농도가 높을 수 있음을 의미하고, 환기에 의한 내부공기의 희석이 부족한 실험주택의 특징 때문일 것이다.

Table 3에는 각 공간별 실내 공기 중 흡입경로로의 노출 가능한 이론적 DEHP 총량을 산출한 결과를 나타내었다. 이 때, 거실 및 주방의 경우, 0.005 mg, 침실 1은 0.002 mg, 침실 2는 0.003 mg 그리고 침실 3은 0.004 mg으로 계산되었다. 흡입경로를 통한 DEHP의 노출 총량 비교를 위하여 선행연구를 검토하였으며, 선행연구에서 제시하는 DEHP의 연령대별 평균 노출량은 3.7×10^{-5} mg/kg/day (0~6세), 1.1×10^{-5} mg/kg/day (7~12세), 7.1×10^{-6} mg/kg/day (13~18세), 7.4×10^{-6} mg/kg/day (19세 이상)이었다.¹⁵⁾ 위의 노출평가 결과에 모의 실험주택 운영기간(149일), 인구집단의 체중(10.4 kg~64.5 kg)^{15,26,27)}을 고려하여 계산된 흡입경로의 DEHP 노출 총량은 5.3×10^{-4} mg (0~6세)~ 1.7×10^{-5} mg (19세 이상) 수준이었다. 본 연구에서 산출된 흡입경로의 평균 DEHP 노출 총량인 3.6×10^{-3} mg과 비교할 때, 대체적으로 본 연구의 노출 총량이 높았다. 이는 실내공기 중 DEHP를 모두 흡입한다는 본 연구의 가정에서 오는 차이로, 인구집단별 호흡률이 반영되어 산출된 선행연구의 노출 총량보다 높은 것으로 판단된다. 또한 실험주택의 미환기 조건도 선행연구와 결과 차이를 유발했을 것이다. 향후 본 연구결과를 토대로 한 실질적인 노출평가가 수행되면 보다 정확한 비교가 가능할 것이다.

3. 바닥먼지 중 DEHP 함량분석 결과 및 경구를 통한 노출 가능한 DEHP 총량

Fig. 3A에는 모의 실험주택 내 거실 및 주방 그리고 각 침실에서 채취한 바닥먼지에 존재하는 DEHP 농도의 월별 변화와 산술평균 농도를 나타내었다. 거실 및 주방과 침실 1의 경우, 2회차(8월)에서 DEHP 농도가 최대였으며, 각각 750.4 mg/kg, 997.3 mg/kg으로 나타났다. 그 이후 회차별 채취한 바닥먼지 중 DEHP 농도는 감소하다가 마지막 분석에서 소폭 증가하였다. 침실 2의 경우 1회차(7월)에 채취된 DEHP 농도가 최대 550.9 mg/kg로 검출된 후 5회차까지 감소하였다. Fig. 3B에는 모의 실험주택 내 실내공간별로 5회 동안 검출된 DEHP

의 평균농도를 제시하였다. 거실 및 주방, 침실 1, 침실 2, 침실 3에서의 DEHP 평균농도는 각각 470.9 mg/kg, 551.6 mg/kg, 336.3 mg/kg, 283.6 mg/kg으로 나타나 침실 1에서 가장 높게, 침실 3에서 가장 낮게 검출되었다. 각 실내공간의 바닥먼지 중 DEHP 농도는 회차별로 차이를 보였지만, 간헐적으로 온도가 약 10°C 높게 유지된 침실 3에서는 5개월간 평균농도인 283.6 mg/kg 수준으로 비교적 일정했다. 바닥먼지 중 DEHP 농도는 실내공기 중 DEHP 농도와 비교, 먼지로의 전이 그리고 주변 온도가 고려된 해석이 필요하다. 모의 실험주택의 거실 및 주방, 침실 1, 침실 2의 바닥먼지 중 DEHP의 경우, 실내공기 중 DEHP 농도가 증가함에 따라 공간 내 입자상 물질로 DEHP의 흡착 및 낙하 그리고 바닥재와의 직접 접촉에 의한 DEHP의 전이가 반영되어¹⁰⁻¹²⁾ 7~8월에 확인된 바닥먼지에서 DEHP 농도가 높았다(Fig. 3A). 이후 공기 중 DEHP 방출이 감소 및 완료됨에 따라 바닥먼지 중 DEHP 농도는 바닥재와의 직접 접촉에 의한 DEHP의 전이만 영향을 받기 때문에 9~11월의 바닥먼지 중 DEHP 농도는 감소하다 대체적으로 일정해지는 경향을 보였다. 이는 공간 차이와 상관없이 실험주택 운영 말기로 갈수록 바닥먼지 중 DEHP 농도들은 평균농도 보다 낮았다는 것을 의미하기도 한다(Fig. 3B). 침실 1의 경우 이론적인 DEHP 총량은 다른 공간에 비하여 낮지만, 침실 1에 시공된 바닥재 FL-2는 FL-1에 비해 상층부의 DEHP 함량 농도가 약 2배 높기 때문에 침실 1의 바닥먼지 중 DEHP 농도가 다른 공간보다 높게

Table 3. Theoretical total di(2-ethyl-hexyl) phthalate (DEHP) amount via inhalation exposure

Room no.	DEHP concentration (ng/m ³ , Avg.)	Indoor space area (m ³)	Theoretical total DEHP amount via inhalation exposure (mg)
Living room & kitchen	95.1	56.0	0.005
Room #1	114.8	18.3	0.002
Room #2	115.7	25.5	0.003
Room #3	275.2	14.1	0.004
Avg./Sum			0.004/0.014

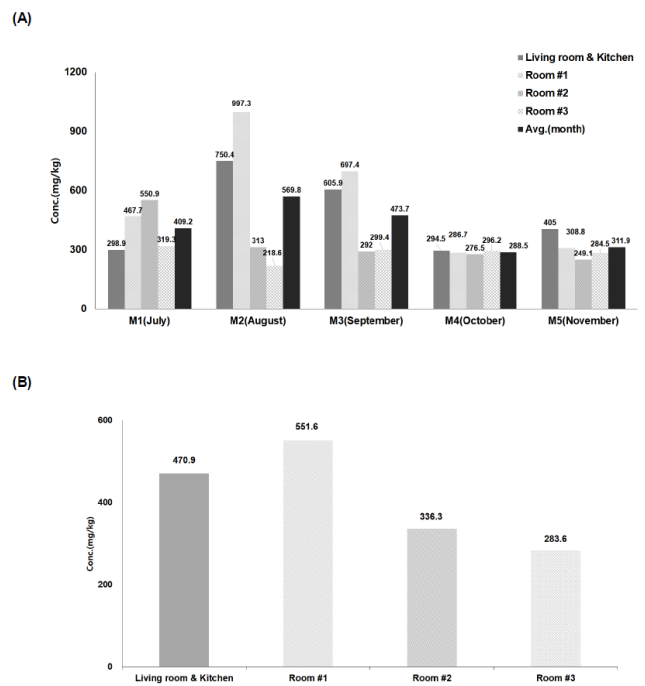


Fig. 3. (A) Changes in concentrations of di(2-ethyl-hexyl) phthalate (DEHP) in floor dust in indoor spaces at each time point and (B) the average concentration of DEHP in floor dust in each indoor space

검출되었을 것으로 추정된다. 또 한 가지 특징적인 점은, 타 공간에 비하여 5~10°C 수준으로 운영온도가 높았던 침실 3의 경우, 실내공기로의 더 많은 DEHP 방출이 일어나고 상대적으로 높은 온도로 인한 공기와 바닥재 표면과의 빠른 평형이 이루어져 더 이른 시점에서 DEHP 농도가 일정한 수준을 보였다 는 것이다. 이에 따라 침실 3에서의 5개월간 평균 바닥먼지 중 DEHP 농도는 월별 농도와 대체적으로 유사한 결과를 보였다 (Fig. 3B).

바닥먼지 중 DEHP 농도와 실내공기질 관리법상 일평균 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 유지기준의 합인 150 µg/m³을 공간 내 먼지 총량으로 가정하여 바닥먼지 섭취를 통한 경구경로로 이론적으로 노출 가능한 DEHP 총량으로 Table 4에 나타내었다. 거실 및 주방의 경우 2.9 mg, 침실 1은 1.1 mg, 침실 2는 1.0 mg 그리고 침실 3은 0.4 mg으로 산출되었다. Table 4에서 보여준대로 본 연구에서 산출된 경구경로를 통한 이론적 DEHP의 노출 총량은 0.4~2.9 mg으로, 국내 바닥먼지 농도로부터 경구경로의 DEHP 노출량을 조사한 선행연구 결과와 비교하였다. 선행연구에서 경구경로에 대한 DEHP 노출량은 5.71 µg/kg/day (유아)~0.44 µg/kg/day (성인)으로 제시하고 있다.⁶⁾ 이 결과에 실험주택 운영기간(149일), 인구집단의 체중(10.4 kg~64.5 kg)^{15,26,27)}을 고려하여 계산된 경구경로의 DEHP 노출 총량은 8.2×10⁻² mg (0~6세)~1.0×10⁻³ mg (성인)으로 산출되었다. 본 연구에서 산출된 경구경로의 평균 DEHP 노출 총량 결과

(1.3 mg)와 선행연구에서 높게 나타난 0~3세의 DEHP 노출 총량과 비교해보면, 본 연구에서 산출된 노출량이 약 150배 이상 높았다. 이러한 노출량 차이는 본 연구가 실내공간에서 발생된 먼지 전체가 경구경로로 노출된다는 가정에서 오는 차이이며, 실제 먼지섭취율 그리고 실내공간에서 발생하는 바닥먼지 양의 실측 결과 등이 반영된다면, 선행연구 결과와의 노출량 차이는 줄어들 수 있다고 판단된다.

4. 모의 실험주택 내 이론적 DEHP 총량 대비 노출경로별 총량 비율 산출

Table 5에는 모의 실험주택 내 노출 가능한 이론적 DEHP의 총량 대비 각 경로별 노출 가능한 DEHP 총량에 대한 비율을 나타내었다. Table 2에서 모의 실험주택 전체에서 노출 가능한 이론적 DEHP 총량은 2,361 g으로 산출되었으며, DEHP 총량 대비 6.0×10⁻⁷%가 공기 중으로(모의 실험주택 전체의 DEHP 합: 0.014 mg) 그리고 2.3×10⁻⁴%가 바닥먼지(모의 실험주택 전체 합: 5.5 mg)에 존재함을 정량적으로 확인하였다. 이를 통해 흡입노출보다 경구노출을 통하여 노출되는 DEHP의 양이 약 380배 높음을 확인하였으며 특히, 거실 및 주방의 경우 그 차이가 가장 높았다(553배). 간헐적으로 운영조건이 약 10°C 높은 유지된 침실 3의 경우, 다른 공간에 비하여 흡입 및 경구 노출 비율의 차이가 낮음을 확인하였는데, 이는 타 공간에 비하여 온도의 영향으로 표면에서 DEHP의 방출이 가속되어 실

Table 4. Theoretical total di(2-ethyl-hexyl) phthalate (DEHP) amount via oral exposure

Room no.	Sum of DEHP concentration in floor dust for 5 months (mg/kg)	Total amount of floor dust for 5 months (g)*	Theoretical total DEHP amount via oral exposure (mg)
Living room & kitchen	2,355	1.2	2.9
Room #1	2,758	0.4	1.1
Room #2	1,682	0.6	1.0
Room #3	1,418	0.3	0.4
Avg./sum			1.4/5.5

*To calculate the total amount of floor dust, criteria (PM₁₀+PM_{2.5}, 150 µg/m³) for maintaining indoor air quality and space volume in a test house were considered.

Table 5. Di(2-ethyl-hexyl) phthalate (DEHP) exposure ratio between oral and inhalation

Room no.	Exposure ratio (%)		Exposure rate by route (oral/inhalation)
	DEHP amount (inhalation route)/ total DEHP amount in a test house	DEHP amount (oral route)/ total DEHP amount in a test house	
Living room & kitchen	6.6×10 ⁻⁷	3.6×10 ⁻⁴	553
Room #1	4.3×10 ⁻⁷	2.3×10 ⁻⁴	537
Room #2	5.2×10 ⁻⁷	1.7×10 ⁻⁴	325
Room #3	8.0×10 ⁻⁷	9.2×10 ⁻⁵	115
Entire room	6.0×10 ⁻⁷	2.3×10 ⁻⁴	384

내 공기 내 DEHP 존재 비율이 높고, 공기와 바닥재 표면과의 빠른 평형을 통해 공기-먼지 간의 DEHP의 농도의 평형이 이루어져 다른 공간에 비하여 그 비율 차이가 크지 않은 것으로 판단된다. 모델식을 활용한 3세 이하 유아의 DEHP의 경로별 노출평가가 관련 선행연구 결과에서도 DEHP는 경구노출량이 흡입 경로에 비하여 약 5,000배 이상 높았다.¹³⁾ 이 결과는 유아와 같은 특정 인구집단에 대한 실내공간에서 DEHP의 노출은 경구 섭취가 주요한 노출경로임을 확인시켜주고 있으며, 흡입을 통한 노출은 극히 적거나 무시할만한 수준임을 반증하는 결과이다.⁶⁾

모델식을 통하여 산출된 경구/흡입의 노출비율 차이는 본 연구의 실측기반의 경구/흡입의 노출비율과 비교하였을 때 큰 차이가 확인되었기 때문에, 국내 실측결과를 바탕으로 진행된 (0~6)세 이하의 유아의 노출평가 결과를^{6,14)} 토대로 본 연구의 노출 기간(149일)과 인구집단의 체중(10.4 kg)^{14,26,27)} 고려하여 본 연구의 동일조건에서 DEHP의 노출량을 재산출하였다. 산출 결과, DEHP 노출은 흡입경로 $5.3 \times 10^{-4} \text{ mg}^{14)}$ 에 비해 경구 경로 $7.9 \times 10^{-2} \text{ mg}^{6)}$ 노출량이 약 150배 높은 것으로 계산되었다. 종합해 보면, 경로별 노출 비율의 차이는 있으나 실내공간의 DEHP 노출은 흡입보다는 경구에 의한 노출비율이 훨씬 높은 노출 형태를 보인다는 결론에 도달할 수 있다.

본 연구는 모의 실험주택 내에 DEHP 노출원인 바닥재 및 벽지를 시공한 후, 5개월 동안의 실내공기 및 바닥먼지 중 DEHP 실측결과를 기반으로 DEHP의 노출 총량을 정량적으로 산출하여 흡입에 비하여 경구 노출비율이 높다는 것을 이론적으로 제시하였다. 다만, 본 연구는 DEHP의 노출원을 바닥재와 벽지에 한정하였고, 모의 실험주택의 특성상 DEHP 함유 제품 마모에 의한 노출의 가속화(본 연구에서는 표면 노출만 가정) 및 먼지 발생량의 증가 그리고 주기적인 환기 및 먼지제거 등과 같은 DEHP 노출에 영향을 미칠 수 있는 다양한 환경 변수를 모두 고려하였다고 보기 어렵다. 그럼에도 불구하고 모의 실험주택 내에 동일한 프탈레이트 노출원(바닥재 및 벽지)을 시공한 후, 같은 실내공간에서 DEHP의 노출형태(흡입, 경구)가 동시에 일어난다는 가정에서 장기간 모니터링을 수행했다는 것에 의의가 있다. 또한 장기간의 모니터링 결과를 토대로, DEHP의 노출이 흡입 및 경구가 동시에 일어나는 경우, 흡입보다는 경구에 대한 DEHP 이론적 노출량이 약 380배 많음을 정량적으로 제시함으로써 노출 경로를 개별적으로 고려했던 기존 연구들의 한계를 극복하고자 하였다. 향후 수행될 실질적인 노출평가 결과와 비교를 통해 DEHP 노출수준 및 노출원을 파악하는데 중요한 이론적 배경이 된다. 또한 본 연구에서 수행한 연구방법은 DEHP와 같은 다양한 종류의 SVOCs (Semi Volatile Organic Compounds)류의 노출특성을 파악하는데 활용될 수 있을 것이다.

IV. 결 론

본 연구는 실내에서 차지하는 비중이 높은 바닥재 및 벽지가 실내공간에서 DEHP의 주요 노출원임을 가정하여 DEHP가 함유된 바닥재 및 벽지를 모의 실험주택에 시공하였고, 약 5개월 간 실내공기와 바닥먼지 중 DEHP 농도를 모니터링하였다. 모니터링 결과를 통하여 DEHP 함량수준과 실내온도가 실내공기와 바닥먼지 중 DEHP 농도를 결정하는 주요 인자로 확인되었다. 그리고 공간의 이론적 DEHP 총량과 흡입 및 경구 노출 경로별 이론적 DEHP의 노출량을 산출한 후, 흡입 노출에 비하여 경구노출을 통한 이론적 DEHP의 노출량은 약 380배 높음을 확인하였다. 국내의 DEHP 노출평가 관련 연구를 토대로 경로별 노출량을 비교하였을 때, 노출비율 차이는 있었지만 실내공간 내 DEHP의 노출 중 경구노출이 주요 노출경로임을 정량적으로 제시할 수 있었다.

본 연구는 모의 실험주택에서 DEHP와 같은 SVOCs류로 분류되는 물질에 대하여 비교적 장기간 모니터링을 통한 실측 결과를 토대로 노출 경로별 비율을 산출한 연구로, 향후 DEHP와 같은 SVOCs류의 경로별 노출특성 파악을 위한 기초자료로 활용될 수 있다고 판단된다. 본 연구결과를 토대로 실제 노출량 파악을 위한 경로별 노출평가와 모의 실험주택 운영상 한계를 극복하기 위한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생활화학제품 안전관리 기술개발사업(No. 2020002970002)의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

Conflict of Interest

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

References

- Holland M. Socio-economic assessment of phthalates. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development; 2018 May. Report No.: ENV/WKP(2018)7.
- Wang Y, Qian H. Phthalates and their impacts on human health. *Healthcare (Basel)*. 2021; 9(5): 603.
- Eales J, Bethel A, Galloway T, Hopkinson P, Morrissey K, Short RE, et al. Human health impacts of exposure to phthalate plasticizers: an overview of reviews. *Environ Int*. 2022; 158: 106903.
- Sim KT, Song KB, Kim H, Kim IG, Lee CH, Park S, et al. Probabilistic exposure assessment of phthalates in children's products. *J*

- Korean Soc Environ Anal.* 2018; 21(1): 41-51.
5. Kim DY, Chun SH, Jung Y, Mohamed DFMS, Kim HS, Kang DY, et al. Phthalate plasticizers in children's products and estimation of exposure: importance of migration rate. *Int J Environ Res Public Health.* 2020; 17(22): 8582.
 6. National Institute of Food and Drug Safety Evaluation (NIFDS). Study on the aggregated risk assessment of phthalates to human health. Osong: NIFDS; 2019 Dec. Report No.: TRKO202000029950.
 7. Yang JY, Shin DC, Lee SE, Lee GW, Kim JH, Lee YJ, et al. Study on the indoor exposure factors of phthalates using bio-monitoring data. *J Odor Indoor Environ.* 2018; 17(4): 315-321.
 8. Khaled R, Elabed S, Masarani A, Almulla A, Almheiri S, Koniyyath R, et al. Human biomonitoring of environmental contaminants in Gulf Countries - current status and future directions. *Environ Res.* 2023; 236(Pt 1): 116650.
 9. Arbuckle TE, Gaudreau É, MacPherson S, Kabasakal M, Borghese MM, Fisher M, et al. Measurement of 24 phthalate metabolites in 1st trimester urine samples: the MIREC study. *Chemosphere.* 2023; 338: 139603.
 10. Shinohara N, Mizukoshi A, Uchiyama M, Tanaka H. Emission characteristics of diethylhexyl phthalate (DEHP) from building materials determined using a passive flux sampler and micro-chamber. *PLoS One.* 2019; 14(9): e0222557.
 11. Jeon S, Kim KT, Choi K. Migration of DEHP and DINP into dust from PVC flooring products at different surface temperature. *Sci Total Environ.* 2016; 547: 441-446.
 12. Shinohara N, Uchino K. Diethylhexyl phthalate (DEHP) emission to indoor air and transfer to house dust from a PVC sheet. *Sci Total Environ.* 2020; 711: 134573.
 13. Little JC, Weschler CJ, Nazaroff WW, Liu Z, Cohen Hubal EA. Rapid methods to estimate potential exposure to semivolatile organic compounds in the indoor environment. *Environ Sci Technol.* 2012; 46(20): 11171-11178.
 14. Joen JI, Lee HW, Lee SH, Lee JI, Lee CM. Exposure assessment of phthalates from house dust and organic films in the indoor environment. *J Environ Health Sci.* 2022; 48(2): 75-85.
 15. Bi C, Liang Y, Xu Y. Fate and transport of phthalates in indoor environments and the influence of temperature: a case study in a test house. *Environ Sci Technol.* 2015; 49(16): 9674-9681.
 16. Guo Y, Kannan K. Comparative assessment of human exposure to phthalate esters from house dust in China and the United States. *Environ Sci Technol.* 2011; 45(8): 3788-3794.
 17. Korean Industrial Standards. Floorcovering-PVC. (KS Standard No. M 3802). Available: <https://ks.or.kr/library/search/stdtdetail.do?itemNo=K001010137316&itemCd=K00101> [Accessed 5 September 2023].
 18. Korean Agency for Technology and Standards. Wallpapers and floor coverings on a base of paper (regulation of Korean Agency for Technology and Standards No. 2021-0483). Available: https://www.kats.go.kr/content.do?cmsid=239&_dc=1537192810628&mode=view&page=67&cid=22659 [Accessed 5 September 2023].
 19. Korean Industrial Standards. Determination of phthalate plasticizers in polymer materials (KS Standard No. M 1991). Available: <https://ks.or.kr/library/search/stdtdetail.do?itemNo=K001010134830&itemCd=K00101> [Accessed 5 September 2023].
 20. Regulation of National Institute of Environmental Research No. 2023-1 (2023.01.05.). Available: <https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99%EC%8B%A4%EB%82%B4%EA%B3%B5%EA%B8%B0%EC%A7%88%20%EA%B3%B5%EC%A0%95%EC%8B%9C%ED%97%98%EA%B8%B0%EC%A4%80> [Accessed 5 September 2023].
 21. International Organization for Standardization (ISO). Indoor air-part 33: determination of phthalates with gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS). Available: <https://www.iso.org/standard/63690.html> [Accessed 5 September 2023].
 22. American Society for Testing Materials (ASTM). Standard practice for collection of floor dust for chemical analysis. Available: <https://www.astm.org/d5438-17.html> [Accessed 5 September 2023].
 23. Dueñas-Mas MJ, Ballesteros-Gómez A, Rubio S. Supramolecular solvent-based microextraction of aryl-phosphate flame retardants in indoor dust from houses and education buildings in Spain. *Sci Total Environ.* 2020; 733: 139291.
 24. Dubocq F, Kärnman A, Gustavsson J, Wang T. Comprehensive chemical characterization of indoor dust by target, suspect screening and nontarget analysis using LC-HRMS and GC-HRMS. *Environ Pollut.* 2021; 276: 116701.
 25. Jílková S, Melymuk L, Vojta Š, Vykoukalová M, Bohlin-Nizzetto P, Klánová J. Small-scale spatial variability of flame retardants in indoor dust and implications for dust sampling. *Chemosphere.* 2018; 206: 132-141.
 26. National Institute of Environmental Research (NIER). Korean exposure factors handbook. Incheon: NIER; 2019.
 27. National Institute of Environmental Research (NIER). Korean exposure factors handbook for children. Incheon: NIER; 2019.

〈저자정보〉

천사호(책임연구원), 이가원(주임연구원), 김승중(주임연구원), 정승표(주임연구원), 강다영(주임연구원), 김기태(교수)