

마감공사후 경과시간에 따른 복합마감재의 VOCs/VVOCs 방출량과 실내농도에 관한 연구

윤 창 현, 권 경 우*, 박 준 석†
한양대학교 대학원 건축공학과*, 한양대학교 건축대학 건축공학부†

Emission rates of VOCs/VVOCs from multi-layers and their impacts on indoor air quality of Apartments

Chang Hyun Yoon, Kyung Woo Kwon*, Jun Seok Park†
*Graduate School of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
†Department of Architectural Engineering, The College of Architecture, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT: The purpose of this study is to evaluate the impacts of finishing materials' VVOCs and VOCs emission rates on indoor air quality of Apartment. VOCs emission rate of multi-layer finishing is predicted using the effective diffusion coefficient of each materials, and then the prediction is compared with Mock-up test and sample apartment house. From the results, the prediction of multi-layer finishing using the effective diffusion coefficient show good relation with the measured values.

Key words: Indoor Air Quality(실내공기질), VOCs(휘발성유기화학물질), Emission rates(방출량), Multi-layers finishing(복합마감재)

1. 서론

주거공간에서 사용되는 각종 마감재로부터는 많은 종류의 휘발성 유기화학물질(이하 VOCs), 이 실내로 방출되고 있어^{1),2)} 실내공기질의 개선의 측면에서 개별 건축마감재에서의 VOCs 방출량을 평가하고 예측하기 위한 다양한 모델들이 제안되고 있다³⁾. 그러나 주거공간에서는 개별 마감재가 단독으로 사용되기 보다는 바닥, 벽, 천정 등에서와 같이 복합재의 한 구성요소로 사용되고 있어 실내 공기중의 장단기 VOCs 농도를 예측하기 위해서는 이러한 개별 마감재의 방출량 데이터뿐 만아니라 개별 마감재가 복층으로 연결된 구조 내에서의 VOCs 거동 및 방출량을 파악할 필요가 있다.

선행연구에서는 먼저, Cup법을 이용하여 개별 자재와 복합재에서의 VOCs 유효확산계수⁴⁾를 측정하여 복합재 내에서의 VOCs 거동을 해석하였고, Mock-up 실험을 통하여 복합재에서의 VOCs 방출량 예측모델의 타당성과 예측정도를 검증하였다.⁵⁾ 본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 방출량이 다른 개별 마감재의 선정에 따른 장단기 실내 VVOCs와 VOCs 농도를 파악하고자 Mock-up과 현장측정 실험을 실시하였다.

2. 실험 및 측정개요

2.1 Mock-up 실험 및 현장측정 개요

개별 마감재 시공에 다른 복합마감재에서의 오염물질 방출량특성과 장단기 실내오염물질농도의 변화 추이를 파악하기 Table 1에 나타낸 실험동에서 Mock-up 실험을 실시하였다. 실험동은 전체 3층의 RC구조의 건물이며, 실험은 3층에

†Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-1743; fax: +82-22296-5331

E-mail address: junpark@hanyang.ac.kr

위치한 바닥면적 24.91m²의 두 개 실로 하였다. 실험실은 마감공사가 되지 않은 노출 콘크리트 상태의 실로 입구에는 전면에 큰 유리창이 설치되어 있으며, 맞은편에는 소형의 창이 하나가 있다. Table 2에는 개별 마감재의 구성을 정리하여 나타낸다. 실험에서는 먼저 공동주택에서 일반적으로 사용되고 있는 마감재와 마감공사를 조사하고, 이를 바탕으로 Mock-up 실험의 마감재를 선정하였으며 공동주택에서의와 같은 동일한 방법으로 마감을 하였다. 실험에 사용된 각 마감재는 한국 공기청정협회로부터 제공 받아 시공하였으며 개별 자재의 방출량은 Table 2와 같다. Mock-up 실험에서는 재현성 검증 및 분석오차를 위하여 두 개실(이하 Room1과 Room2)에서 동일한 마감자재와 공법으로 마감을 실시하였고, 2005년 10월부터 11월까지 43일간 마감 후의 마감자재에서의 폼알데하이드와 VOCs 방출량과 실내농도를 측정하였다.

Mock-up 실험결과를 검증하기 위하여, 기존의 공동주택에서 현장측정을 실시하였다. 측정대상으로는 건축 후 약 20년이 경과된 공동주택으로, 15층 아파트의 7층에 위치한 57평형 세대로 하였으며, 거주자가 거주하고 있는 상태에서 측정을 실시하였다. 측정세대에서는 먼저 기존의 벽과 바닥의 마감재를 모두 철거 시킨 후, Mock-up 실험에서 사용한 Table 2와 동일한 마감재를 가지고 새로이 바닥과 벽 그리고 천장만을 재 마감한 후, 32일간 실내공기 중의 폼알데하이드와 VOCs 농도, 그리고 마감재에서 방출되는 폼알데하이드와 VOCs의 방출량을 측정하였다.

2.3 측정항목 및 방법

Table 4에 측정항목 및 분석기기를 나타낸다. 측정대상 오염물질은 환경부에서 공동주택의 실내 공기질 기준으로 가이드라인을 제시하고 있는 폼알데하이드 그리고 톨루엔, 스티렌, 에틸벤젠, 자이렌 등의 VOCs와 TVOCs로 하였다. 폼알데하이드와 VOCs는 환경부의 공정시험법에 준하여 실시하였으며, 그 외에 실험실의 온습도와 기밀성능을 측정하였다. 실내 공기 중의 폼알데하이드와 VOCs는 정유량 펌프를 이용하여 각각 2회씩, 폼알데하이드는 Supelco사의 DNPH-Cartridge를 이용하여 500ml/min의 유속으로 30분간 측정하였고, VOCs는

Table 1 Outline of Mock-up

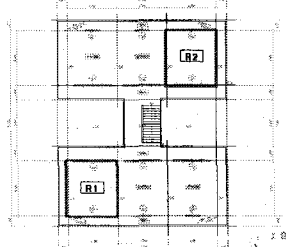
Structure	RC / 3 floors
Mock-up	3rd floor
Volume	4.7[W]×5.3[D]×2.4[H] [m]
Temp./RH	16-24 °C/30-70% (None Air conditioning)
Ventilation	0.2/h (4.3 cm ² /m ² at 4Pa)
Plan	

Table 2 Detail of finishing materials

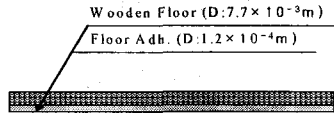
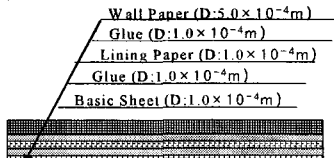
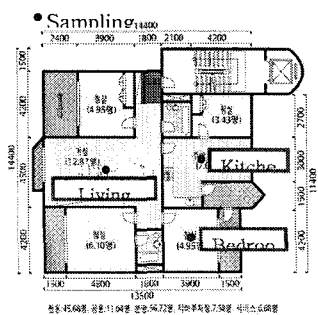
Materials	Emission rate [μg/m ²]	
	Formaldehyde	TVOCs
Wooden Floor	18.0	29.0
Floor Adh.	3.0	70.0
Lining Paper	6.0	65.0
Glue	8.0	74.0
Wall paper	N.D	16.0
Floor		
Wall and Ceiling		

Table 3 Outline of the measured apartment

Structure	RC / 15 floors
Floor	7th floor
Area	188 [m ²]
Temp./RH	21-25 °C/20-60% (Floor heating)
Ventilation	0.2/h (4.3 cm ² /m ² at 4Pa)
Plan	

Sibata사의 유기용매용 VOCs-tube를 사용하여 샘플링 하였다. 바닥과 벽 등의 마감재부터의 폼알데하이드와 VOCs방출량은 FLEC (Field and laboratory Emission Cell)를 이용하여 1시간 동안 측정하였다. 또한 Mock-up과 공동주택의 기밀성능은 Blower Door를 이용하여 측정하였다.

3. 측정결과

3.1 복합마감재에서의 WOCs와 VOCs방출량

Fig.1에 Mock-up실험실의 벽 복합마감에서 방출되는 폼알데하이드와 TVOCs의 방출량을 나타낸다. 폼알데하이드의 경우, 동일한 시공 방법과 측정법에서도 Room1과 Room2에서 시공 후에는 약 $40\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 의 방출량 차이를 나타냈으나 1주 후에는 Room1과 Room2에서 모두 $56\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 정도의 폼알데하이드를 방출하고 있는 것으로 조사되었으며 벽 마감에 사용된 초배지, 벽지 그리고 접착제 등 개별 자재의 방출량의 합 보다는 다소 높은 방출량을 보이고 있는 것으로 나타났다.

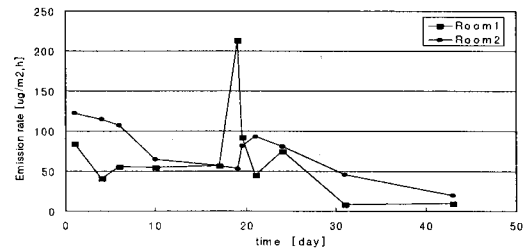
Bake-out 중에는 Room1의 폼알데하이드 방출량은 Room2의 약 4배 이상까지 증가하였고, 이후 Room2 보다 낮은 방출량을 나타내고 있는 것으로 나타났으며, 약 2주에 뒤에는 Room1과 Room2에서의 방출량에 차이가 없는 것으로 조사되었다. TVOCs의 경우에 있어서도 폼알데하이드와 유사한 경향을 나타내고 있으며 시공 직후에 있어서는 Room1과 Room2에서 약 $80\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 의 방출량 차이를 나타냈으나 시간의 경과에 따라 그 차이는 감소하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 2에 바닥 복합마감 후의 폼알데하이드와 TVOCs의 방출량을 나타낸다. 마감 직후의 바닥의 폼알데하이드 방출량은 벽 보다 다소 낮은 약 $60\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ 을 나타냈으나, 벽과 유사한 경향을 나타내 마감시간이 경과함에 따라 실간 차이는 줄어들고 있는 것으로 조사되었다. 또한 벽의 경우 마감 40일 후에는 초기에 비하여 방출량이 30%까지 감소되는 경향을 나타냈으나 바닥의 경우 시판 경과에 따른 방출량 감소가 적으므로 것으로 조사되었다. Bake-out에서도 벽과 유사한 경향을 나타내 Bake-out 후의시간 경과에 따라 실간의 차이는 줄어들고 있는 것으로 조사되었다.

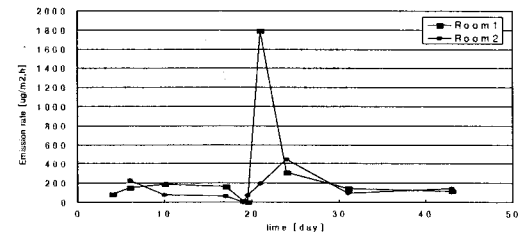
TVOCs의 경우에 있어서도 마감 직후에는 실간에 방출량 차이가 있으나 시간 경과에 따라 그

Table 4 Sampling and analysis method

factors	method
Formaldehyde	DNPH cartridge (Supelco) 10 L (167ml/min) HPLC, High Performance Liquid Chromatography, Waters
VOCs	Charcoal tube (SIBATA) 10 L (167ml/min) GC/FID, Shimazu
Emission rate	FLEC, Field and Laboratory Emission Cell
Temp./RH	Hobo date logger, Onset
Air tightness	Minneapolis Blower Door, The ENERGY CONSERVATORY

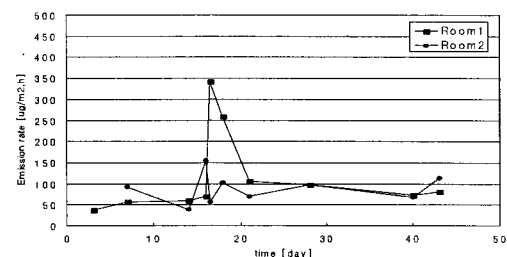


(a) formaldehyde

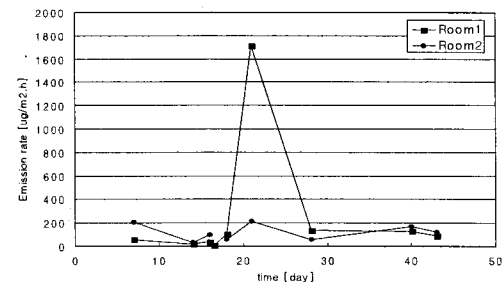


(b) TVOCs

Fig.1 Emission rate of Wall multi-layer



(a) formaldehyde



(b) TVOCs

Fig. 2 Emission rate of Floor multi-layer

차이는 줄어들고 있는 것으로 나타났으며, 마감 40일 후에는 개별자의 방출량의 합과 유사한 약 $100\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ TVOCs 방출량을 나타냈다. 또한 Bake-out 중에는 TVOCs 방출량이 약 8배 증가하는 것으로 조사되었으나 벽과 마찬가지로 bake-out에 따른 현저한 방출량 감소 효과는 없는 것으로 나타났다.

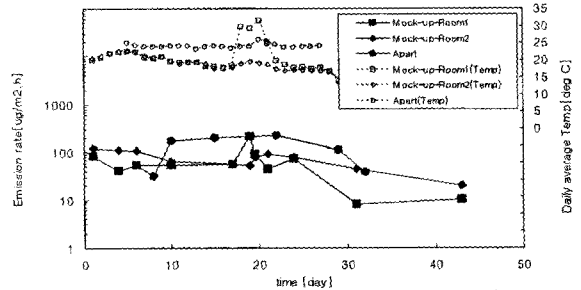
Fig. 3과 Fig. 4에는 공동주택에서의 측정결과와 Mock-up실험의 결과를 비교하여 나타낸다. 마감제로 부터의 폼알데하이드와 TVOCs 방출은 실내의 온습도 그리고 기류조건에 따라 많은 영향을 받는다^(6),7),8). Mock-up과 공동주택의 경우 실내 온도조건이 상이하여 초기에는 폼알데하이드와 VOCs의 방출량에 큰 차이를 나타내었으나, 시간의 경과와 함께 방출량이 감소되면서 그 차이가 점차 줄어드는 경향을 나타냈다. 또한 마감 30일 후에는 Mock-up에서의 각 마감 자재의 폼알데하이드와 VOCs 방출량이 공동주택과 유사한 것으로 조사되었다. 각 마감제에서의 방출량 특성을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

먼저, 벽 마감의 경우, Mock-up에서는 마감 7일 후까지 폼알데하이드가 $41\text{--}107\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$, TVOCs는 $86\text{--}147\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ 의 방출량을 나타냈으며 시간의 경과에 따라 방출량이 지속적으로 감소하여 마감 30일 후에는 폼알데하이드 $10\text{--}20\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$, TVOCs는 $117\text{--}145\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ 의 수준으로 방출량이 감소하였다. 공동주택의 경우, 실내 난방의 영향으로 마감 20일째까지는 Mock-up 보다 폼알데하이드는 약 1.5배, TVOCs는 이보다 높은 약 7배의 방출량을 나타내었으나 마감 30일 후에는 폼알데하이드가 $38\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ TVOCs가 $151\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ 의 방출량을 나타내 Mock-up 실험의 결과와 유사한 값을 나타냈다.

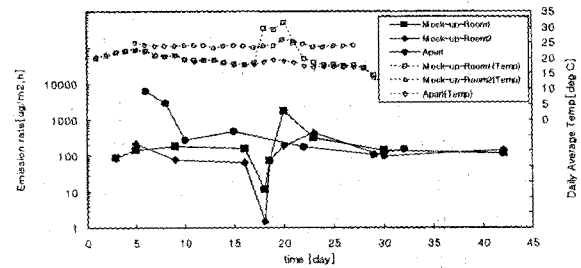
바닥 마감의 경우에도 마감 초기에는 Mock-up과 공동주택에서 방출량이 큰 차이가 있으나 마감 30일 이후에는 공동주택에서의 폼알데하이드와 TVOCs 방출량이 Mock-up 실험 결과와 유사한 폼알데하이드 $87\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$, TVOCs는 $111\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ 의 방출량을 나타내는 것으로 조사되었다.

3.2 복합마감 후의 실내 WOCs/VOCs농도

Fig. 5에 개별 자재 마감 후의 실내 폼알데하이드와 TVOCs 장기농도 변화를 정리하여 나타낸다. Mock-up 실험실의 경우 각 2회 측정치의 평균

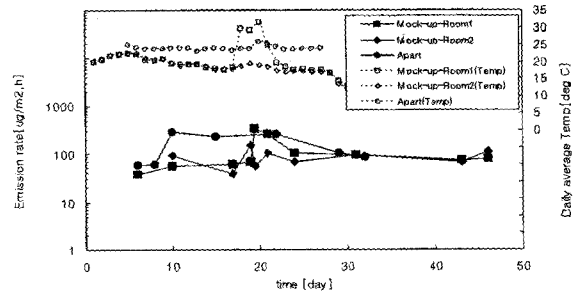


(a) formaldehyde

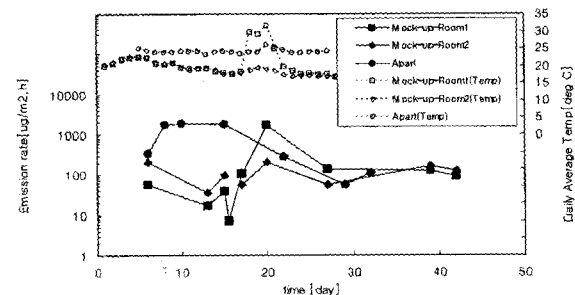


(b) TVOCs

Fig. 3 Emission rate of Wall multi-layer in Mock-up and Apartment



(a) formaldehyde



(b) TVOCs

Fig. 4 Emission rate of Floor multi-layer in Mock-up and Apartment

을 나타내며 공동주택의 경우는 개별 실의 농도를 나타내었다. 폼알데하이드의 경우, TVOCs와 같은 급격한 농도감쇄는 없으며, 마감 초기에 Mock-up실험실은 $43\text{--}54\mu\text{g}/\text{m}^3$, 공동주택은 이보다 높은 $208\text{--}225\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을, 마감 30일 이후에는 $76\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 유지되는 것으로 조사되었다. TVOCs의 경우는 초기에 $1300\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘는 농도를 보이다, 마감 15일 이후에는 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 농도가 감쇄되었으며 마감 30일 이후에는 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 농도를 유지하는 것으로 조사 되었다.

환경부에서는 “다중이용시설의 실내공기질관리법”에서 공동주택의 실내공기질 유지기준으로 폼알데하이드는 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, TVOCs에 대해서는 권고기준으로 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하를 제시하고 있다. 또한 신축공동주택의 경우, 실내공기질의 권장기준으로 폼알데하이드에 대하여 $210\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하를 적용하고 있다. 본 실험결과 신축공동주택의 폼알데하이드 권고기준을 대부분 만족하는 것으로 나타났으며, 마감 30일 이후에는 다중이용시설의 실내공기질관리법에서 제시하고 있는 폼알데하이드의 유지기준을 만족하는 것으로 조사 되었다. TVOCs의 경우 마감 15일 이후에는 환경부의 다중이용시설의 실내공기질관리법에서 정한 TVOCs의 권고기준을 만족하였으며, 개별 VOCs의 경우에도 신축공동주택의 권고기준을 모두 만족하는 것으로 조사되었다.

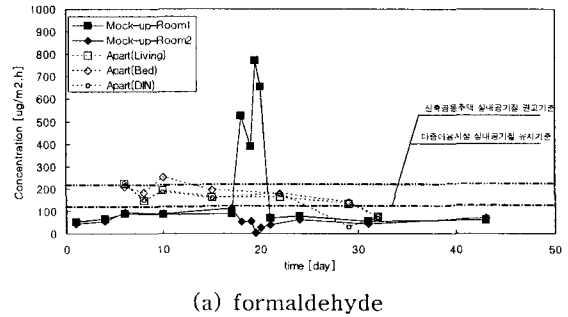
4. 개별 마감재 선정에 따른 실내농도예측

개별 마감재 선정에 따른 실내공기질의 영향을 파악하고자 복합 마감재에서의 TVOCs방출량 예측 결과를 바탕으로 장단기 실내 TVOCs농도 변화를 평가하였다. 먼저, 기존의 연구성과로부터 개별자재의 유효확산계수를 통하여 예측한 복합 마감재의 방출량값⁴⁾을 아래의 질량보존방정식에 대입하여 이산화 하였다.

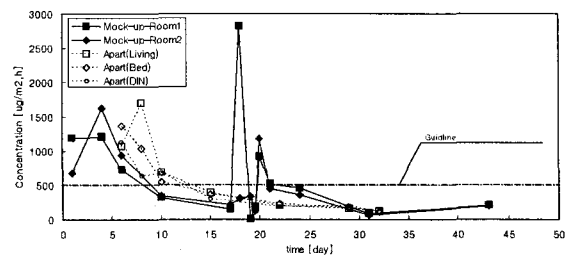
$$V \frac{\partial C_i(t)}{\partial t} = Q(C_o - C_i) + \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial R_i(t)}{\partial t} = h(C_o - C_i(t)) \quad (2)$$

시뮬레이션조건으로는 Mock-up실험과 동일하게 실온은 등온의 상태로 20°C , 실내는 완전확산의



(a) formaldehyde



(b) TVOCs

Fig. 5 Indoor formaldehyde and TVOCs concentration in Mock-up and Apartment

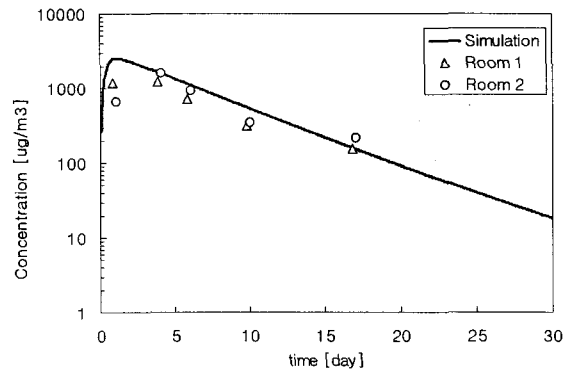


Fig. 6 Comparison of simulation and measured TVOCs concentration in Mock-up

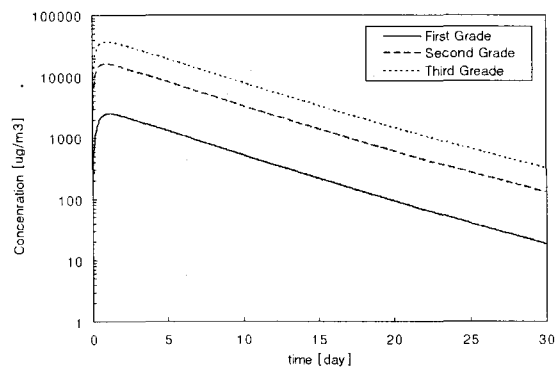


Fig. 7 Simulation results of Indoor TVOCs concentration according to finishing materials

조건을 가정하였고, 틈새에 따른 자연환기량은 0.2회/h로 설정하였으며 사용된 개별마감자재도 동일한 것으로 하였다.

Fig. 6에 예측값과 Mock-up에서의 실측값을 비교하여 나타낸다. 개별 마감재에서의 TVOCs 방출량이 정상상태에 도달하기 전에는 예측 값이 실측값보다 높았던 것과 같이 실내 TVOC 농도 예측에 있어서도 마감 후 14일 까지는 예측치가 실측치 보다 높게 나타나고 있다. 그러나 마감 후 14일 이후에서는 실측치와 예측치 사이에 유효한 상관관계를 나타내고 있는 것으로 조사되었다. Fig. 7에는 한국공기청정협회에서 사용되고 있는 등급별 자재 사용에 따른 실내 TVOC농도의 예측 값을 나타낸다. 방출량이 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ (접착제 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ 미만)미만인 개별 마감재를 사용하여 실내를 마감 하였을 경우, 마감 후 3일 후에는 최대 2530 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내나 시간의 경과와 함께 지수적으로 실내농도가 감소하여 마감 20일 이후에는 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하를 유지하는 것으로 예측되었다. 이보다 방출량이 많은 우수와 양호의 경우는 마감 20일 이후에, 각각 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내 환경부의 다중이용시설 등의 실내공기질관리법에서 제시하고 있는 TVOCs권고 기준을 초과하는 것으로 예측되었다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 방출량이 다른 개별 마감재의 선정에 따른 장단기 실내 VVOCs와 VOCs 농도를 파악하고자 Mock-up과 현장측정 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Mock-up과 공동주택의 경우 실내 온도조건이 상이하여 초기에는 벽과 바닥 마감 후에 폼알데하이드와 VOCs의 방출량에 큰 차이를 나타내었으나, 시간의 경과와 함께 방출량이 감소되면서 그 차이가 점차 줄어드는 경향을 나타냈다.
- (2) 벽과 천정 마감의 경우, Mock-up에서는 시간의 경과에 따라 방출량이 지속적으로 감소하여 마감 30일 후에는 폼알데하이드 10-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$, TVOCs는 117-145 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ 의 수준으로 방출량이 감소하였다. 공동주택의 경우도 초기에는 차이가 있으나 30일 후에는 폼알데하이드가 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$

TVOCs가 151 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ 의 방출량을 나타내 Mock-up 실험의 결과와 유사한 값을 나타냈다.

(3) 바닥 마감의 경우, Mock-up 실험실에서는 마감 30일 후에는 폼알데하이드가 67-114 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$, TVOCs는 93-167 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ 로 나타나 시간 경과에 따른 방출량의 감소가 벽 마감 보다는 작은 것으로 조사되었고 공동주택의 경우 마감 30일 이후에는 공동주택에서의 폼알데하이드와 TVOCs 방출량이 Mock-up 실험 결과와 유사한 폼알데하이드 87 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$, TVOCs는 111 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ 의 방출량을 나타냈다.

(4) 개별 마감재에서의 VOCs전달을 등온상태의 1차원 흐름으로 가정하고 Fick의 확산법칙을 적용하여 복합 마감 후의 TVOCs방출량을 평가하고, 이를 통하여 개별자재 선정에 따른 실내 TVOCs 장기농도변화를 예측하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 우수연구센터육성사업의 지원(R11-2005-056 -02002-0(2006))과 한국공기청정협회의 지원으로 수행되었음

참고문헌

1. ECA (1991), Guideline for the characterization of VOCs emitted from indoor materials and products using small test chamber, Indoor Air Quality and Its impact on Man, Report No.8,
2. Park Jun-seok, et al (1998) "Survey on Volatile Organic Compounds and The Effect of Emissions from Building Materials in Residence", Transactions of Architecture Institute of Japan, 509, 27-3
3. Wolkoff, P. and Nielsen, P.A (1996). Approach for Indoor Climate Labelling of Building Materials, Atmospheric Environments, Vol. 30, pp. 2679-268
4. Park Junseok, Yoon Chang-hyun and Kwon Kyung-woo, 2005, Study on Prediction of VOCs Emission rates from Multi-layers Materials by using Effective Diffusion Coefficients, Proceeding of AIK 2005 fall annual conference
5. Park Junseok, Yoon Chang-hyun and Kwon Kyung-woo, 2005, Prediction of VOCs Emissions from Multi-layers Materials, Korean Journal of SAREK
6. Wolkoff P., Kjar U. D., Knudsen H. N. and Nielsen P. A. (1996), Characterization of emissions from building products: Long-term chemical evaluation. The impact of air velocity and concentration, Proceedings of Indoor Air 1996, Vol. 4, 337-342
7. Crump D. R. and Madany I. M. (1993), Daily variations of volatile organic compound concentrations in residential indoor air, Proceeding of Indoor Air 1993, Vol. 2, 15-20
8. Yu C. W. F., Crump D. R. and Squire R. W. (1999), The effect of introducing new materials on the indoor concentrations of VOCs and formaldehyde in an unoccupied test house, Proceeding of Indoor air 1999, Vol.1, 420-425