

폴리우레탄 폼의 휘발성 유기화합물 확산 및 분배계수 산정

The Determination of Diffusion and Partition Coefficients of PUF

박진수* · John C. Little¹⁾ · 김신도²⁾ · 이희관³⁾ · 공부주

국립환경과학원 기후대기연구부,

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering Virginia Tech,

²⁾서울시립대학교 환경공학부, ³⁾인천대학교 토목환경공학과

(2009년 9월 18일 접수, 2009년 12월 2일 수정, 2010년 2월 4일 채택)

JinSoo Park*, John C. Little¹⁾, ShinDo Kim²⁾, HeeKwan Lee³⁾ and BooJu Kong
Climate and Air Quality Research Department National Institute of Environmental Research

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering Virginia Tech,

²⁾Department of Environmental Engineering University of Seoul,

³⁾Department of Civil and Environmental Engineering Incheon University

(Received 18 September 2009, revised 2 December 2009, accepted 4 February 2010)

Abstract

The diffusion and partition coefficients of polyurethane foam (PUF) are estimated using a microbalance experiment and small chamber test. The microbalance is used to measure sorption/desorption kinetics and equilibrium data. When the diffusion condition is controlled in the chamber of the sample, interactions between volatile organic compounds (VOCs) and PUF can lead to the estimation of a relatively homogenous rate of mass transfer in the interiors and surfaces of PUF. The estimates of the material/air partition coefficient (K) and the material-phase diffusion coefficient (D) are shown to be independent of the concentrations of VOCs. This approach, if applied to a diffusion-controlled or physically-based model, can facilitate more precise prediction of their source/sink behavior. Although further research and more rigorous validation is needed, an emission model applied with the diffusion and partition coefficients from this research holds promise for the improvement of reliability in predicting the behavior of VOCs emitted from porous building materials by D and K.

Key words : PUF (Polyurethane Foam), Emission, Indoor air quality, Microbalance, Sorption, Diffusion

1. 서 론

건물중후군이나 새집증후군, 화학물질과민증은 주

로 폐쇄된 실내공간에서 발생하며, 이러한 증상의 원인은 환기불량, 실내건축자재로부터 오염물질 방출, 복합 화학물질에서 방출되는 휘발성 유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds), 폼알데하이드 등이 주원인으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2008a). 우리나라의 경

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-836-4114, E-mail : airchemi@korea.kr

우 2003년 5월 ‘다중이용시설 등의 실내공기질 관리법’ 제정을 전·후로 건축자재에서 방출되는 오염물질로 인한 공동주택 입주인 피해를 줄이기 위한 연구가 건설업체를 포함한 건축자재 생산업체, 국공립 연구기관, 민간연구기관 및 대학에서 다양하게 이루어지고 있다(Jang *et al.*, 2005a; Jang *et al.*, 2004b; Minister of Environment, 2004). 대부분의 실내공기오염물질은 건축자재나 가구, 가전제품, 가정용품에서 발생하는 휘발성 유기화합물로 알려져 있다(Kim, 2006). 벤젠, 톨루엔 등 일부 휘발성 유기화합물은 저농도에 장기간 노출 시 암의 원인이 될 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(Zhang and Smith, 2003). 건축자재에서 실내로 배출되는 휘발성 유기화합물은 건축자재와 공기의 증기압 차이에 의한 증발과 건축자재 내·외부의 농도차로 인해 확산 방출된다. 확산에 영향을 주는 요인으로는 온도, 습도, 환기량, 자재의 두께와 표면적, 오염물질의 함유밀도, 표면 처리상태, 재료의 흡착과 탈착성 등이 있다(Yang *et al.*, 2001a, b). 이러한 실내 오염현상의 효과적이고 경제적인 관리를 위해서는 오염물질의 방출 및 전달과정에 대한 이해가 필수적이다. 그러나 우리나라에서는 소형챔버를 이용한 방출량 또는 방출계수의 측정과 실내농도 측정에만 연구가 집중되어 실내오염물질 전달과정 및 제거과정을 해석하는 데 있어 상당 부분 국외 자료를 인용하고 있다.

본 연구에서는 연질폼, 경질폼, 도료, 접착제, 밀폐제, 탄성체, 섬유, 플라스틱 등의 다양한 용도로 응용 사용되고 있으며 특히, 실내건축에서 충전재, 단열재, 접착제, 가구재료, 카펫(carpet) 등에 사용되는 PUF(polyurethane form)의 확산 및 분배계수를 실험적으로 추정하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 PUF(Polyurethane Foam)

미국에서 나일론 66이 개발된 이후, 독일에서는 나일론에 경쟁할 수 있는 인조 섬유를 생산할 목적으로 디이소시아나이트(diisocyanate)와 디올(diol)을 사용하여 폴리우레탄(polyurethane, PU)을 합성하였다(wikipedia, 2009). PUF는 분자내에 우레탄결합을 가지고 있는 고분자화합물로서 폴리올과 이소시아나이트를 주재료로 기능성 첨가제를 반응시켜 얻어지는

Table 1. How polyurethanes are used US data from 2004 (PURRC, 2007).

Application	Amount of polyurethane used (millions of pounds)	Percentage of total
Building & Construction	1,459	26.8%
Transportation	1,298	23.8%
Furniture & Bedding	1,127	20.7%
Appliances	278	5.1%
Packaging	251	4.6%
Textiles, Fibers & Apparel	181	3.3%
Machinery & Foundry	178	3.3%
Electronics	75	1.4%
Footwear	39	0.7%
Other uses	558	10.2%
Total	5,444	100.0%

발포 생성물이다. 분자내 결합구조의 유연성, 수소결합, 결정화 및 가교결합 정도, 폼(form)의 크기와 형태에 따라 사용분야가 결정된다. PUF는 식(1) 분자 결합과정에서 히드록시기, 아마이드기 등과 반응시켜 다양한 특성화 재료를 공업적으로 대량 생산할 수 있다. 식(1)에서 R은 알칸계(alkanes) 탄화수소이다.

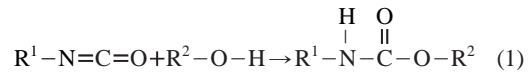


표 1은 미국에서 2004년 사용된 PUF의 양과 사용 목적을 요약한 것이다. 2007년 세계적으로 1,200만 톤의 PUF가 사용된 것으로 추정되고 있으며, 사용량은 매년 5% 이상 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다(PURRC, 2007). 그림 1은 폴리우레탄의 사용특성을 도식화하여 나타낸 것이다.

2.2 실험재료의 선정 및 시료 전처리

실내오염현상에 대한 PUF 영향을 평가하기 위하여 단열재 및 가구제작에 사용되는 PUF를 시중에서 구입하여 실험에 사용하였다. PUF는 자동차나 쿠션을 필요로 하는 가구 등에 사용되며, 사용 목적에 따라 다양한 형태로 가공된다. 시중에서 판매되는 쿠션용 PUF를 구입하여 정밀 제작된 원형 펀치를 이용하여 원기둥 시료를 제작하여 실험에 사용하였다. 시료는 직경 1.16 cm, 길이 3.58 cm 크기로 제작하여 테프론(Teflon) 줄로 미량저울에 연결하였다. 그림 2는 PUF 규격을 나타낸 것이다.

시료내에 남아있는 휘발성 유기화합물을 신속히 제

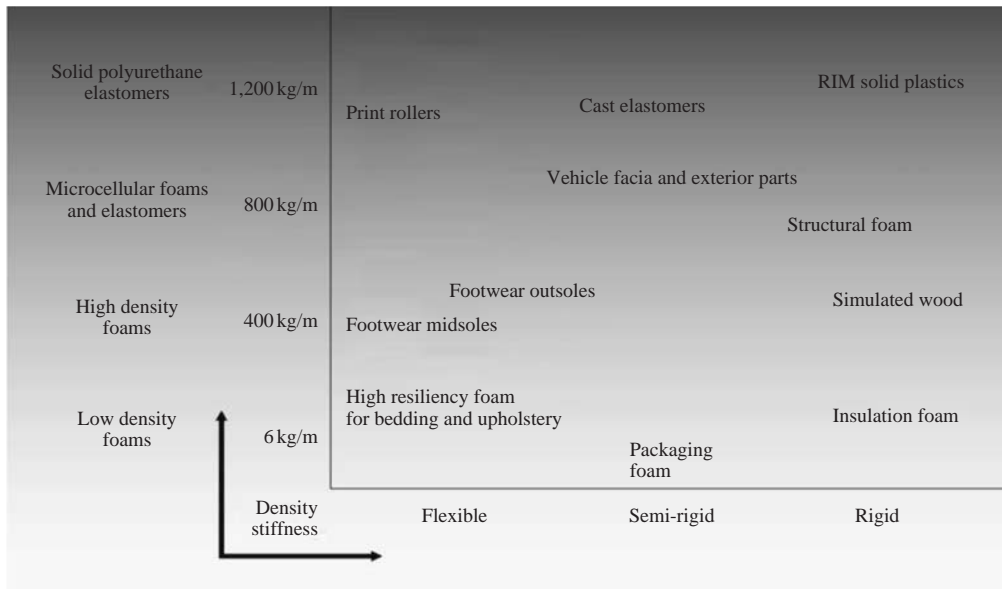


Fig. 1. Characteristics of polyurethane materials (Wikipedia, 2009).

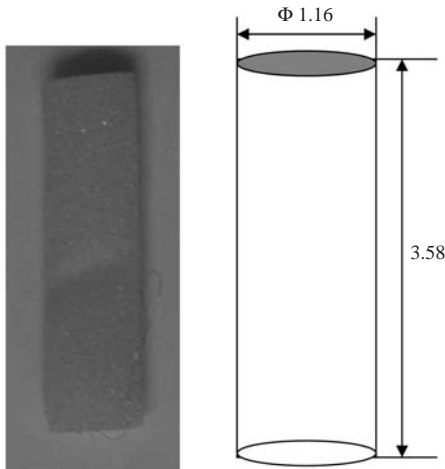


Fig. 2. Photography of test sample and the dimension of cylinder type sample.

거하기 위해 내부를 테프론(teflon) 코팅한 소형 챔버를 GC (agilent, 6890) 오븐에 장치하고 고순도 (99.999%) 질소 (Nitrogen, N₂)를 일정한 유량 (300 cc/min)으로 주입하며 5일 동안 시료의 무게변화를 측정하였다. Cox *et al.* (2001)의 경우 장판 (vinyl flooring) 시료를

전처리 하지 않고, 안정화 되기를 기다렸을 경우 19~23일 가량이 소모되는 문제점과 제거되지 않는 VOCs의 지속적인 방출로 인해 탈착시간이 길어지는 문제점이 발생한 바 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 Park *et al.* (2008b)은 소형 챔버를 이용한 시료내 VOCs 제거 방법을 사용한 바 있다. 본 연구에서는 Park *et al.* (2008b)과 같은 방법으로 PUF의 물리화학적 변화가 없는 최적 제거조건을 반복실험을 통해 결정하였다. 30°C부터 2°C씩 온도를 70°C까지 올려가며 시료무게와 물리화학적 특성을 1시간 간격으로 조사한 결과 PUF의 손상 없이 VOCs를 제거할 수 있는 온도는 60±0.2°C이었다. 장판 시료의 경우 6일 경과 후 질량 감소율은 초기 시료무게 0.1% 미만의 감소를 나타내는 것으로 보고된 바 있으나 (Park *et al.*, 2008b), PUF는 6시간 이후 일정한 무게에 수렴하였다. PUF의 무게는 최초 97.51 mg에서 감소하여 97.34 mg에 수렴하였다.

2.3 미량저울 (microbalance) 및 VOCs 발생

0.1~0.5 µg까지 칭량할 수 있는 미량저울 (microbalance, ModelD200-02, Cahn)을 사용하였으며, 흡착과 탈착과정의 무게를 PC-DAQ (Data Acquisition sys-

tem)을 이용하여 질량변화를 기록하였다. 미량저울 진동오차를 최소화하기 위하여 방진고무와 스프링을 이용한 방진시스템을 설치하여 건물진동 및 외부진동을 최소화하였다. 또한 건조한 조건에서 발생하기 쉬운 정전기 영향과 급격한 외부온도 변화를 차단하기 위하여 전체시스템을 표면이 알루미늄으로 처리된 폴리에틸렌(polyethylene)을 사용하여 포장하였다. 또한 내부 장치에 접지선을 투입하여 정전기 영향을 제거하였다. 측정챔버 내부온도는 온도조절기(Isotemp, 1028D, Fisher Scientific)를 이용하여 $24.6 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 또한 시료를 칭량하는 챔버와 실험실에 온도센서(RTD, Model 2Pt100G3050, Omega)를 설치하여 온도를 연속 측정하였다.

그림 3은 미량저울 및 챔버 구조를 나타낸 것이다. 발생장치에서 발생한 혼합가스는 시료가 설치된 소형 챔버(sample chamber)에 유입되어 시료에 흡착되며, 흡착이 종료되면 밸브의 위치를 바꿔 순수한 질소가 소형 챔버에 유입되어 탈착이 시작되게 하였다. 또한 미량저울 오른쪽에 설치된 테어 챔버(tare chamber)는 미량저울의 교정을 위해 설치된 것이며, 본 연구에서

는 실험장치 제작 시 상대습도에 대한 미량저울의 간섭효과를 평가하기 위하여 사용하였으며, 상대습도 변화에 민감한 반응을 보여 측정시스템을 외부와 격리시키도록 장치를 구성하였다.

모든 유로는 스테인레스(3.2 mm O.D 304)와 테프론 튜빙(Teflon tubing)을 사용하였으며, 시료 챔버 바닥에는 미세한 유리 구슬 산기장치(diffuser)를 설치하여 챔버내부에 유속차이가 최소화 되도록 하여 시료의 움직임을 최소화 하였다. 흡착실험에는 GC(Gas Chromatogram) 교정에 사용되는 확산식 발생장치(Dynacalibrator Model190, VICI Metronics, Inc.)를 사용하였다. 이 장치는 대상물질을 석영 셀(quartz cell)에 넣은 후 일정온도(70°C)를 설정하면 증발된 휘발성 유기화합물이 질소와 함께 시료가 설치된 소형챔버에 이송되는 방식이다. 일정한 질소 유량을 유지할 목적으로 2개의 MFC(Mass Flow Controller, Tylan-General)를 사용하였으며, 발생한 VOCs 농도는 실험 전후 확산 셀(Diffusion Cell) 무게차이를 공급된 가스량으로 나누어 구할 수 있다. 이 과정을 식(2)에 나타내었다.

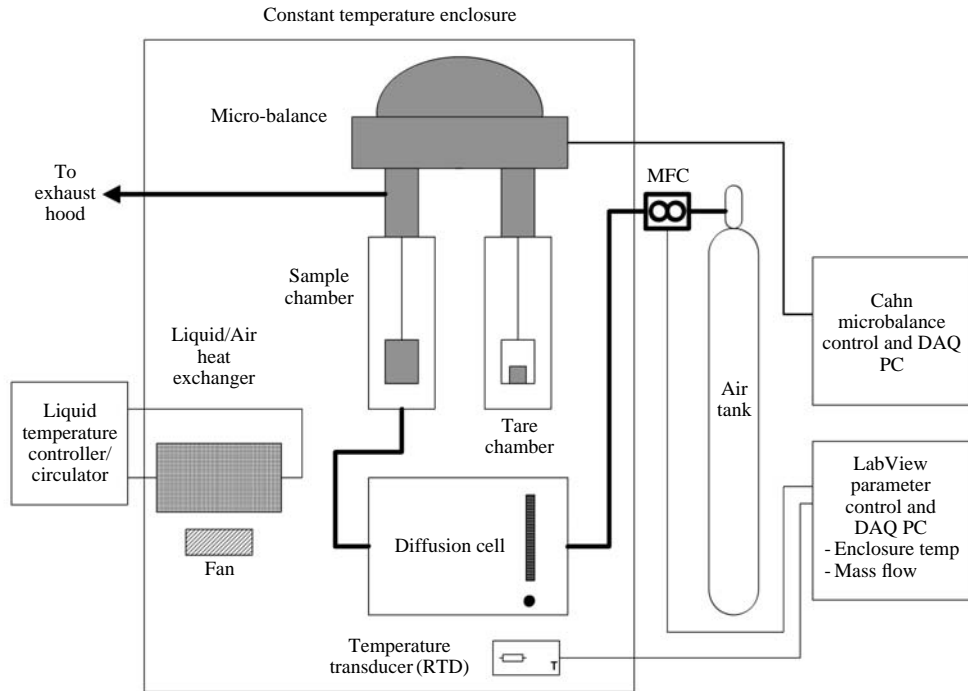


Fig. 3. The diagram of the microbalance system and tare chamber.

$$C_g = \frac{\Delta w}{\Delta t / V} \quad (2)$$

여기서 Δw 는 확산 셀의 전후 무게차이 (mg), t 는 시간 (sec), V 는 확산장치를 통과한 가스의 유량 (L/sec)을 나타낸다. 표 2는 실험 및 계산 조건을 나타낸 것이며, 표 3은 확산식 발생장치에서 발생된 물질별 발생량을 산정하여 요약한 것이다.

2.4 확산계수 (D), 분배계수 (K) 산정

시료를 미량저울이 장치된 챔버에 설치한 후 깨끗한 공기를 통과시켜 시료에 부착된 수분 및 챔버 내부로 유입된 수분을 제거하였다. 본 연구에서는 질량 변동 값 10개의 이동평균 값이 1% 미만으로 수렴할 경우 수분 및 오염물질이 완전히 외부로 배출되어 PUF가 안정화 된 것으로 간주하였다. 본 시스템의 경우 시료 장치 후 2.2~3.1시간 (hour)에 평형에 도달하였다.

시료가 안정 평형상태 (steady state)에 도달한 후 흡착과정이 시작되면 식(2)을 통해 농도를 알고 있는 혼합가스를 측정챔버로 유입시켰으며, 시료의 무게 변화는 미량저울로 30초 간격으로 기록하였다. 또한, 흡착에 의해 증가한 시료무게가 일정한 값에 수렴하는 경우, 같은 기준을 적용하여 충분한 안정 평형조건에 도달한 것으로 하였다. 평형 도달 후 유로를 변경하여 순수한 질소만 챔버에 흐르도록 하여 탈착을 진행하였다.

미량저울 자료수집용 컴퓨터에 저장된 질량 자료를 이용하여 K, D를 산정하였다. 휘발성 유기화합물과 시료의 흡착 평형상태는 분배계수 (Partition coefficient, K) 식(3)으로 표현할 수 있다.

$$K = \frac{c}{y} \quad (3)$$

여기서, c 는 휘발성 유기화합물이 고체상 시료와 결합하여 평형을 이루는 평형농도 (g-VOC/m³)를 나타내며, y 는 챔버내 가스상 휘발성 유기화합물 평형농도 (g-VOC/m³)를 나타낸다. 식(3)의 선형적인 관계에 의해 K가 크다는 것은 시료의 휘발성 유기화합물 흡착량이 많다는 것을 의미한다. c 는 초기와 흡착평형상태의 시료무게차이를 시료의 부피로 나누어 구할 수 있다. 확산계수(D)는 흡착/탈착 과정 시료의 무게를 확산모델 식(4)에 피팅 (Fitting)하는 방법을 이용하

Table 2. Parameters for testing material specimens for emissions of VOCs.

Parameters	Unit	Value
Temperature	°C	23±1
Relative humidity	%RH	50±5
Sample volume	m ³	3.78 × 10 ⁻⁶
Flow rate	lpm	0.2965

여 구하였다. 본 연구에서는 원통형 PUF를 사용하였으므로 Fick 확산식을 적용하였고, 공극을 가진 매질 내 확산을 나타내는 Crank 식을 적용할 경우 식(4)와 같이 표현할 수 있다 (Crank, 1995).

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{a^2 \alpha_n^2} \cdot \exp(-D_e \alpha_n^2 t) \quad (4)$$

여기서, D_e 는 시료의 유효 확산계수 (effective diffusion coefficient), M_t 는 시간 t 일 때 시료에 흡착되어 남아 있는 휘발성 유기화합물의 양을 나타내며, M_∞ 는 충분한 시간에서 시료에 충분히 흡착되어 포화된 휘발성 유기화합물의 양을 나타낸다. 또한, α_n 는 $J_0(a\alpha_n)=0$ 의 양의 근 (positive roots) 값, a 는 원통시료의 반경, J_0 는 0차 Bessel function을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 휘발성 유기화합물의 흡착 및 탈착

실험에 사용된 부탄올 외 4가지 물질 중 PUF와 반응성이 작으며 포화증기압이 낮아 실내공간에서 배출되는 TVOCs와 유사한 거동 특징을 가질 것으로 판단되는 도데칸 (dodecane)의 흡착 및 탈착 과정을 그림 4에 도시하였다. 휘발성 유기화합물 발생장치에서 발생시킨 혼합가스 중 도데칸 방출 속도가 10.2 μg/min일때, 2회 반복 흡착-탈착 실험으로 구한 질량 증가 및 감소를 나타낸 것이다. 흡착 평형상태는 흡착 시작 후 5.1~6.3 hour에 도달하였고, 탈착 평형상태는 탈착시작 후 4.8~6.4 hour에 도달하였다. 흡착과 탈착된 질량은 높은 대칭성을 보여주고 있으며, 시간적으로는 기존 연구결과를 통해 탈착이 흡착보다 오래 걸린다는 점을 고려할 경우 비교적 높은 대칭성을 보여주고 있다. 이러한 결과는 바닥재 연구결과와 일치하는 것이며, 흡착과 탈착과정이 가역적인 것을 의미

한다. 또한 식(3)의 분배계수(K)에 의해 PUF 외부의 가스상 농도(gas phase)와 PUF 안쪽에 남아 있는 고상(solid phase) 휘발성 유기화합물 농도가 선형적으로 연관되어 있다는 본 연구의 가정이 성립하는 것을 보여 준다(Park *et al.*, 2008b; Cox *et al.*, 2001). 즉 본 연구에서 산정된 확산계수(D)와 분배계수(K)가 실내 건축자재 해석에 적용 가능함을 보여주고 있다.

3.2 휘발성 유기화합물의 K와 D

표 3은 온도 70°C, 유입 질소량 298~307 mL/min의 조건에서 산정된 확산셀 휘발성 유기화합물 배출량을 식(2)로 산정한 것이며, 표 4는 실험에 사용된 물질의 분자량 등 특성치를 요약한 것이다. 표 5는 흡

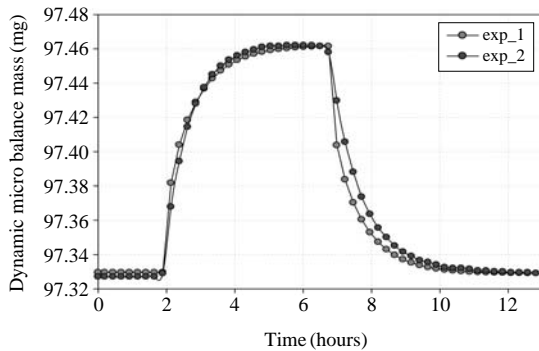


Fig. 4. Mass gain/loss of a sample during sorption/desorption process by dodecanes.

Table 3. Diffusion vial emission rates.

Chemical	Emission rate ($\mu\text{g}/\text{min}$)
n-Butanol	194.149
Decane	43.012
Undecane	21.590
Dodecane	10.192
Tetradecane	8.335

Table 4. Some relevant properties of organic test chemicals.

Chemical	CAS #	Molecular weight (g/mol)	Boiling point ($^{\circ}\text{C}$)	Vapor pressure (mm Hg) at 20 $^{\circ}\text{C}$
n-Butanol	71-36-3	74.1	118	4.4
Decane	124-18-5	142.3	173~174	2.7
Undecane	1120-21-4	156.3	196	1 (33 $^{\circ}\text{C}$)
Dodecane	112-40-3	170.3	216	0.3
Tetradecane	629-59-4	198.4	252	1 (76 $^{\circ}\text{C}$)

착/탈착 과정에서 산정된 K, D 및 휘발성 유기화합물의 특성치를 정리하여 나타낸 것이다. 그림 5를 통해 흡착 및 탈착 시 D 값은 비슷한 수준임을 알 수 있다. 이러한 결과는 Cox *et al.* (2001)의 결과와도 일치한다. 또한, 흡착 확산계수 값이 탈착 확산계수보다 크다는 기존 바닥재나 카펫을 대상으로 한 연구결과와도 유사하였다(Cox *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2001a). 표 5의 K와 D는 2~3회의 반복실험에서 측정된 결과를 식(4)의 왼쪽 항 개념을 이용하여 정규화(normalize)하여 그림 5와 같은 곡선으로 변형한 후, 식(4)의 오른쪽 모델식에 D 값을 바꿔가며 실험자료에 가장 근접한 모델곡선을 구하는 방식으로 D 값을 산정하였다. 유입되는 가스 농도와 시료 무게변화를 고려하여 K를 구한 결과이다.

그림 5에는 동일한 확산계수를 적용한 흡/탈착 모델과 실험치를 비교하여 나타내었다. 흡착과정의 확산계수 값이 탈착 확산계수보다 큰 것을 볼 수 있다. 또한, 동일한 확산계수를 적용할 경우 탈착과정 특히 초기 탈착 시간대에서 방출량이 과소평가될 가능성을 보여주고 있다. 따라서 실내오염현상 해석을 위한 전산유체역학모델에 본 결과를 적용할 경우 5~7% 가량 작은 확산계수(D) 값을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그림 5는 흡착평형 시료 질량을 1로 하여 정규화(normalize)한 흡착/탈착 곡선이며, 대칭성을 확인할 수 있다. 이는 일정한 농도로 도데칸이 공급되는 흡착 과정과 순수한 공기만 공급되는 탈착과정이 비슷한 수준의 확산계수를 갖는 것을 의미한다. 또한, 순수한 가역반응 물질전달 챔버를 가정할 경우 확산계수는 챔버로 유입되는 도데칸 농도와는 독립적인 특성치임을 추정할 수 있다. 그림 6은 분자량과 확산계수의 관계를 나타낸 것이다. 즉 분자량과 확산계수 사이의 상관성 분석에서 결정계수(R^2) 값이 0.79인 것은 PUF와 도데칸 사이에 물질전달속도를 결정하는 확

Table 5. Equilibrium partition and diffusion coefficients (Polyurethane Foam).

Compound	$K \text{ (mg/m}^3\text{)}_{\text{solid}}/\text{(mg/m}^3\text{)}_{\text{air}}$	$D_e \text{ (m}^2\text{/hr)}$
n-Butanol	107.3	3.03×10^{-05}
Decane	71.3	2.27×10^{-06}
Undecane	486.1	1.14×10^{-05}
Dodecane	1378.2	7.71×10^{-06}
Tetradecane	5395.1	5.42×10^{-07}

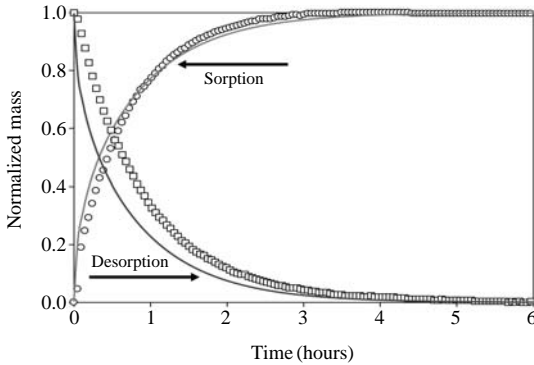


Fig. 5. Fitting transient sorption/desorption data for determination of D by dodecane.

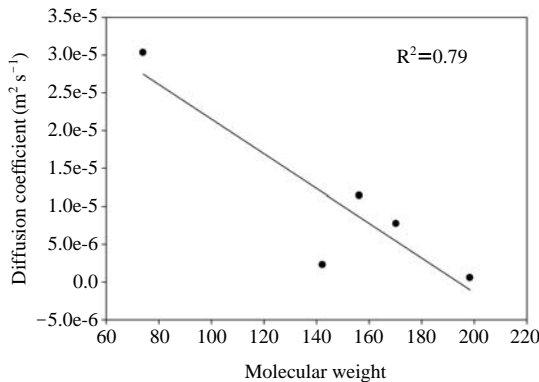


Fig. 6. Correlation of D vs. Molecular weight for test chemicals.

산계수가 분자량에 의해 결정되는 물리 특성과 밀접한 관련이 있음을 의미한다. 또한, 이러한 관계를 통해 분배계수(K)가 증기압과 높은 상관성을 가지고 있음을 추정할 수 있다. 본 연구에서 산정된 PUF의 확산계수는 분자량과, 분배계수(K)는 증기압과 밀접한 관계가 있다는 기존 카펫에서의 연구결과와도 일치

한다(Yuan *et al.*, 2007).

데칸(decane)의 K 값이 부탄올보다 작은 경우도 발생하였으나 전반적으로 증기압과 높은 상관성을 가지고 있었다. 과소 평가된 것으로 판단되는 데칸의 K 값 검토를 위하여 추가적인 반복실험을 실시하였으나 비슷한 결과가 반복되었다. 이와 같은 현상을 밝히기 위해서는 PUF와 데칸 사이에 가역 화학반응을 방해하는 요인 등이 검토되어야 할 것이다. 또한, 산정된 K와 D는 개별물질에 대한 특성으로 실내오염 현상의 경우 각각의 물질이 혼합되어 있는 경우가 우세함으로 혼합물질에 대한 확산 특성 및 분배 특성에 대한 연구와 수분 및 온도 변화에 대한 영향을 평가하는 연구도 추가적으로 필요할 것이다.

4. 결 론

주택 건축이나 실내 가구 및 생활용품 제작에 다량 사용되는 PUF의 오염물질 배출특성을 파악하기 위하여 시중에 판매되는 PUF의 확산 및 분배계수를 실험적인 방법을 통하여 추정하였다. 미량저울을 이용하여 PUF의 시간에 따른 질량 변화를 측정하였으며, 실험에 사용된 PUF의 크기를 고려하여 확산계수(D) 및 분배계수(K)를 산정한 결과, D와 K는 유입되는 휘발성 유기화합물의 농도와는 독립적인 특성을 보이며, 분자량 및 증기압과 상관성이 큰 것으로 파악되었다. 미량저울을 이용하여 구해진 농도감소 자료를 Ficks 식과 Crank 식을 응용한 모델식에 적용시켜 확산 및 분배계수를 추정한 결과 확산계수(D)는 $5.42 \times 10^{-7} \sim 3.03 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{/hr}$, 분배계수(K)는 $107 \sim 5,400 \text{ (mg/m}^3\text{)}_{\text{solid}}/\text{(mg/m}^3\text{)}_{\text{air}}$ 이었다. 이와 같은 실험적 추정을 통하여 PUF내 함유된 휘발성 유기화합물의 방출특성을 설명할 수 있는 확산 및 분배계수를 산정하였고, 이러한 자료는 실내오염 관리를 위한 기초 자료 및 전산유체역학 모델에 적용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구

(KRF-2006-214-D00086)이며, 실험과 장치구성에 도움을 준 Dr. Xu Ying (University of Texas)에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Cox, S.S., D. Zhao, and J.C. Little (2001) Measuring partition and diffusion coefficients for volatile organic compounds in vinyl floorin. *Atmospheric Environment*, 35(22), 3823-3830.
- Crank, J. (1995) *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, New York, 44-49.
- Jang, M., S.D. Kim, and J.S. Yoon (2004a) The Study on Characteristics of VOCs and Formaldehyde Emission rate from Building Materials. The 37th Meeting of KOSAE (2004), Korean Society for Atmospheric Environment, 199-200.
- Jang, S.K., S.J. Lee, Y.S. Cho, K.M. Joeng, and K.H. Jeong (2005b) Assessment of VOCs emission characteristics from building materials such as wall paper, and adhesives using small chamber test, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 21(2), 191-204. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.C. (2006) Trends and control technologies of volatile organic compound, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 22(6), 743-757. (in Korean with English abstract)
- Minster of Environment (2004) *Standard Test Methods for Indoor Air Quality*. Seoul: Korea Governments of Ministry of Environment, 160.
- Park, H.J., S.K. Jang, S.Y. Seo, and J.H. Lim (2008a) Characteristics of VOCs and formaldehyde emitted from floorings, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 25(1), 38-45. (in Korean with English abstract)
- Park, J., J.C. Little, S. Kim, and J. Yun (2008b) The Determination of diffusion and partition coefficients indoor bottom finishing materials, *Journal of Environmental Health Sciences*, 34(3), 219-225.
- PURRC (2007) *The Socio-Economic Impact of Polyurethanes in the United States from the American Chemistry Council. A Committee of the Center for the Polyurethanes Industry*.
- Wikipedia (2009) Polyurethane, <http://www.wikipedia.org> (2009.9.20 last visited).
- Yang, X., Q. Chen, J. Zeng, J.S. Zhang, and C.Y. Shaw (2001a) A mass transfer model for simulating volatile organic compound emissions from 'wet' coating materials applied to absorptive substrates, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(9), 1803-1815.
- Yang, X., Q. Chen, J.S. Zhang, Y. An, J. Zeng, and C.Y. Shaw (2001b) A mass transfer model for simulating VOC sorption on building materials, *Atmospheric Environment*, 35(7), 1291-1299.
- Yuan, H., J.C. Little, and A.T. Hodgson (2007) Transport of polar and non-polar volatile compounds in polystyrene foam and oriented strand board, *Atmospheric Environment*, 41(15), 3241-3250.
- Zhang, J.J. and K.R. Smith (2003) Indoor air pollution, a global health concern, *British Medical Bulletin*, 68(1), 209-225.