

바닥재의 확산계수 및 분배계수 산정

박진수[†] · John C. Little* · 김신도** · 윤중섭***

국립환경과학원 지구환경연구소, *Depart of Civil and Environmental Engineering Virginia Tech,
서울시립대학교 환경공학부, *서울시보건환경연구원 폐기물연구부
(2008. 5. 29. 접수/2008. 6. 11. 수정/2008. 6. 15. 채택)

The Determination of Diffusion and Partition Coefficients of Indoor Bottom Finishing Materials

JinSoo Park[†] · John C. Little* · ShinDo Kim** · JoongSeop Yun***

Global Environment Research Center National Institute of Environmental Research

*Department of Civil and Environmental Engineering Virginia Tech

**Department of Environmental Engineering University of Seoul

***Waste Engineering Team Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health & Environment

(Received May 29, 2008/Revised June 11, 2008/Accepted June 15, 2008)

ABSTRACT

Many building materials may contain high concentrations of volatile organic compounds (VOCs) and other hazardous pollutants(HAPs). Specifically, VOCs discharged by indoor building material may cause "new house" syndrome, atopic dermatitis etc. The diffusion coefficient and initially contained total VOC quantity were determined using microbalance experiments and small chamber tests. Interactions between volatile organic compounds (VOCs) and vinyl flooring (VF), a relatively homogenous, diffusion-controlled building material, were characterized. Rapid determination of the material/air partition coefficient (K) and the material-phase diffusion coefficient (D) for each VOC was achieved by placing thin VF slabs in a dynamic microbalance and subjecting them to controlled sorption/desorption cycles. K and D are shown to be independent of concentration for all of the VOCs and water vapor. This approach can be applied to other diffusion-controlled materials and should facilitate the prediction of their source/sink behavior using physically-based models.

Keywords: building material, emission, indoor air quality, microbalance, sorption

I. 서 론

실내공기오염이 인체에 미치는 악영향에 대한 관심이 높아지고 있으며 실내 공기질을 개선하려는 노력이 여러 다양한 접근방법으로 가시화되고 있다. 특히, 2004년 5월 '다중이용시설 등의 실내공기질 관리법' 제정을 전후로 건축자재에서 방출되는 오염물질로 인한 공동주택 입주민 피해를 줄이기 위한 연구가 건설업체를 포함한 건축자재 생산업체, 국공립연구기관, 민간연구기관 및 대학에서 다양하게 이루어지고 있다 (Environment, 2004; Jang *et al.*, 2004; Jang, *et al.*, 2005).

많은 장점을 가지고 있어 실내 마감재료로 사용되는 바닥재나 벽지등에서 다양한 오염물질이 방출된다. 이런 대부분의 실내공기오염물질은 건축자재나, 가구, 가전제품, 가정용품에서 발생하는 휘발성 유기화합물 (VOCs, Volatile organic Compounds)로 알려져 있다 (Kim, 2006). 휘발성 유기화합물은 유지류를 녹이며 휘발성이 커서 공기 중에 가스로 존재한다. 또한 스며드는 성질이 있어 피부에 흡수되기도 한다. 의복이나 피부에 직접 닿지 않더라도 호흡기로 흡입되면 중추신경 등 주요 신체기관에 영향을 준다. 특히 저농도에 장기간 노출시 암의 원인이 될 가능성이 높다(Zhang and Smith, 2003).

건축자재에서 발생하는 VOCs는 건축자재와 공기의 증기압 차이에 의한 증발과 건축자재 내-외부의 농도차로 인해 확산 방출된다. 방출에 영향을 주는 인자로는 온도, 습도, 환기량, 자재의 두께와 표면적, 오염물질의

[†]Corresponding author : Global Environment Research Center National Institute of Environmental Research
Tel: 82-32-836-4114, Fax: 82-32-836-4116
E-mail : airchemi@uos.ac.kr

함유밀도, 표면 처리상태, 재료의 흡착과 탈착성 등이 있다(Yang *et al.*, 2001a; Yang *et al.*, 2001b).

이런 실내오염물질을 효과적으로 제거하는 방법은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째 방법은 오염물질이 발생하지 않도록 하는 방법이며, 둘째 방법은 발생한 오염물질을 실외로 빠른 시간내에 환기 배출 시키는 것이다. 그러나 오염도를 낮추기 위한 맹목적인 환기량 증가는 에너지 소비증가로 이어질 가능성이 크다. 효과적이고 경제적인 실내공기질관리를 위해서는 오염물질의 방출 및 전달과정에 대한 정확한 이해와 해석이 필요하다. 그러나 지금까지 우리나라에서는 방출 계수의 측정과 실내공간농도 측정에만 연구가 집중되어 실내오염물질 전달과정 및 제거과정을 해석하는데 있어 상당한 부분이 국외 자료만을 인용하고 있다. 본 연구에서는 실내오염물질 확산 및 분배계수산정을 실험적으로 추정(Cox *et al.*, 2001)함으로써, 전산유체역학 등을 이용한 접근에 필요한 기초자료를 제공하고, 기존 환기장치 운영등에 필요한 정보를 산출하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 재료의 선정 및 전처리

사무실 및 아파트에 가장 많이 사용되는 장판재(vinyl flooring)를 실험하였다. 일반적으로 장판재는 50%의 탄산칼슘(calcium carbonate), PVC(polyvinyl chloride), 가소제(plasticizer), 안료(pigment) 그리고 안정화제(stabilizer) 등으로 구성되어 있다. 시중에서 판매되는 바닥재를 구입하여 사용하였으며, 주거용 및 사무실용으로 가장 많이 사용되는 3 mm의 탄성층을 가진 장판재를 사용하였다. 또한 바닥재를 마이크로톰(Model 820-II, Reichert-Jung)을 이용하여 0.28~0.37 mm 두께로 얇게 잘라 실험에 사용하였다(3.65×2.13×0.2 cm). Fig. 1은 실험에 사용된 바닥재, 미량저울(microbalance)에 설치하여 질량 변화를 측정하는데 사용된 시료크기를 나타낸 것이다.

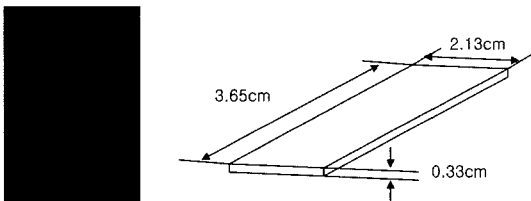


Fig. 1. Photography of test sample and dimension of sliced sample.

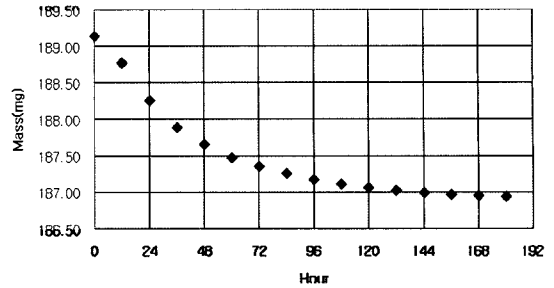


Fig. 2. The variations of sample mass weight (mg) during the sample pretreatment process.

마이크로톰으로 자른 시료에 남아 있는 VOCs (Volatile Organic Compounds)를 제거하기 위하여 클린 챔버(70±0.2°C)에 고순도 질소(Nitrogen, N₂)를 공급하며 7일 동안 질량변화를 관찰하였다. 온도조건(70±0.5°C)은 신속한 시간안에 시료의 물리화학적 변화가 없이 시료내 VOCs를 제거하기 위하여 50°C부터 2°C 씩 온도를 올려가며 12시간 방치 후 시료 이상유무를 검사하여 찾아낸 값이다. 시료무게를 12시간 간격으로 측정하였으며, 5.1일까지 질량 감소율이 비교적 크게 나타났다. 6일 경과후 질량 감소율은 초기 시료무게 0.1% 미만의 감소를 나타내는 것으로 분석되었다. 이와 같이 시료를 순수한 질소가스에 노출시킬 경우 표면에 흡착된 수분량의 감소가 예상되며 실제 미량저울 실험에 사용된 시료는 185.48 mg이었다. Fig. 2는 시간에 따른 전처리 기간동안 시료 질량 변화를 나타낸 것이다.

2. 미량저울(microbalance) 및 VOCs 발생

0.1~0.5 µg까지 칭량할 수 있는 미량저울(microbalance, ModelD200-02, Cahn)를 사용하였으며, 흡착과 탈착과정의 무게를 PC-DAQ(Data Acquisition system)을 이용 질량변화를 측정 기록하였다. 미량저울(microbalance) 진동오차를 최소화하기 위하여 방진고무와 스프링을 이용한 방진시스템을 설치하여 건물진동 및 외부진동을 최소화하였다. 또한 건조한 조건에서 발생하기 쉬운 정전기 영향과 급격한 외부온도 변화를 차단하기 위하여 전체 시스템을 표면이 알루미늄으로 처리된 폴리에틸렌(polyethylene)을 사용하여 시스템을 포장하였다. 내부 실험장치에 접지선을 투입하여 정전기 영향을 제거하였다. 측정챔버 내부온도는 온도조절기(Isotemp, 1028D, Fisher Scientific)를 이용하여 24.6±0.3°C로 유지하였다. 또한 시료를 칭량하는 챔버와 실험실에 온도센서(RTD, Model 2Pt100G3050, Omega)를 설치하여 온도를 연속 측정하였다. Fig. 3은 미량저

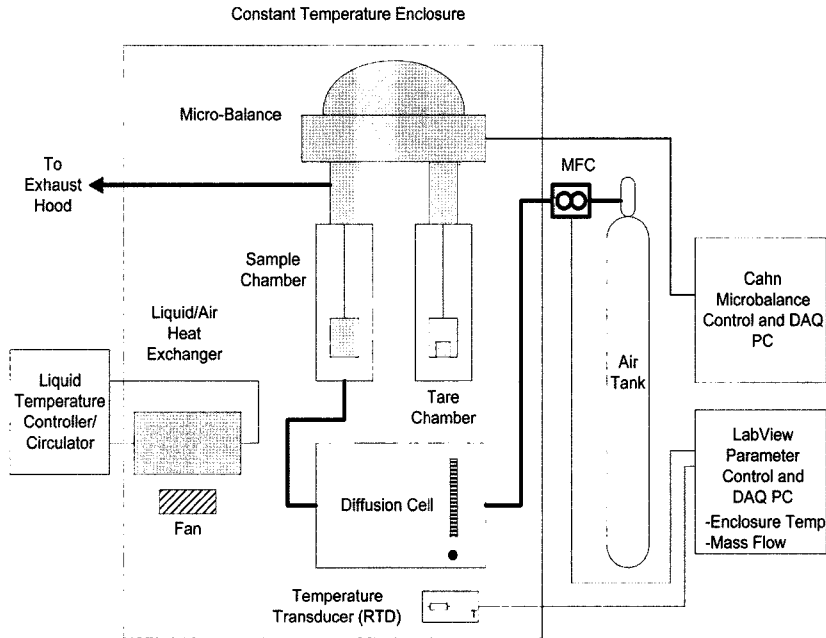


Fig. 3. The diagram of the microbalance system.

울(microbalance) 및 챔버 구조를 나타낸 것이다.

모든 가스유로는 스테인레스(3.2 mm O.D 304)와 테프론(Teflon) 튜빙(tubing)을 사용하였으며, 시료 챔버 바닥에는 미세한 유리 구슬 산기장치를 설치하여 챔버내부에 정상류가 흐르도록 하였다. 흡착실험을 위하여 GC(Gas Chromatogram) 교정에 사용되는 확산식 VOCs 발생장치(Dynacalibrator Model190, VICI Metronics, Inc.)를 사용하였으며, 일정한 양의 가스공급 목적으로 2개의 MFC(Mass Flow Controller, Tylan-General)를 사용하였다. 가스상 VOCs 출력농도는 실험 전후 확산 셀(Diffusion Cell) 무게차이를 공급된 가스량으로 나누어 구할 수 있다. 이러한 과정을 식 (1)에 나타내었다.

$$C_g = \frac{(\Delta w)/\Delta t}{V} \quad (1)$$

여기서 w 는 확산 셀의 전후 무게차이(mg), t 는 시간(sec), V 는 확산장치를 통과한 가스의 유량(l/sec)을 나타낸다.

3. 확산계수(D), 분배계수(K)와 초기 VOCs 함유량(C₀) 산정

시료를 미량저울(microbalance)이 장치된 챔버에 위치시킨 후 깨끗한 공기를 통과시켜 시료에 부착된 수분 및 챔버내부로 유입된 수분을 제거하는 과정이 필요하

다. 본 연구에서는 질량 변동 값 5개의 이동 평균 값이 1% 미만으로 수렴할 경우 수분이 완전히 제거되어 시료가 안정한 평형상태에 도달한 것으로 간주하였다. 본 시스템의 경우 시료 장치 후 4~6시간 안에 평형에 도달하였다.

시료가 평형상태(steady state)에 도달한 후 흡착과정이 시작되면 식 (1)을 통해 농도를 알고 있는 혼합가스가 측정챔버로 유입되며, 시료의 무게 변화는 미량저울(microbalance)로 30초 간격으로 기록하였다. 마찬가지로 무게의 변동이 1% 이하의 변동 값을 나타낼 경우 충분한 평형조건에 도달한 것으로 간주하였다. 평형 도달후 유로를 변경하여 탈착과정을 시작하였다. 탈착과정의 경우 확산 셀(cell)을 통과하지 않은 순수 질소만 측정챔버로 유입시켜 시료에 흡착되었던 VOCs를 탈착시키게 하였다.

1) K와 D

미량저울(microbalance)에 저장된 흡착과 탈착과정의 시료 질량변화 자료를 이용하여 K, D를 산정하였다. VOCs와 시료의 흡착 평형상태는 분배계수(Partition coefficient, K)로 표현할 수 있다.

$$K = \frac{C}{y} \quad (2)$$

여기서, C는 VOCs가 고체상 시료와 결합하여 평형을

이루는 평형농도(g-VOC/m³)를 나타내며, y는 챔버내 가스상 VOCs 평형농도(g-VOC/m³)를 나타낸다. 식 (2)의 선형적인 관계에 의해 K가 크다는 것은 시료의 VOCs 흡착량이 많다는 것을 의미한다. C는 초기와 흡착평형상태의 시료무게차이를 시료의 부피로 나누어 구할 수 있다. 확산계수(D)는 흡착/탈착 과정의 시료의 무게를 확산모델에 피팅(Fitting)시키는 방법을 이용하여 구하였다. 본 연구에서는 얇은 장판재를 사용하였으므로 Fick's 확산식을 적용하고 공극을 가진 매질내 확산을 나타내는 Crank 식을 적용할 경우 식 (3)와 같이 표현할 수 있다(Crank, 1995).

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left\{ \frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2} \right\} \quad (3)$$

여기서 M_t는 시간 t일 경우 얇은 시료로 들어오거나 남아 있는 VOCs의 양을 나타내며, M_∞는 충분한 시간에서 시료에 충분히 흡수되어 포화된 VOCs의 양을 나타낸다. L은 시료의 두께를 나타낸다.

III. 결과 및 고찰

1. VOCs의 흡착 및 탈착

Fig. 4는 VOCs 발생장치에서 발생시킨 혼합가스 중 부탄알(butanol) 농도가 217.5 µg/m³일 때, 2회 반복 흡착-탈착 실험으로 구한 질량 증가 및 감소를 나타낸 것이다. 흡착평형상태는 흡착과정 시작후 5.2~6.1시간에 평형상태에 도달하였고, 탈착평형은 탈착시작 후 5.0~6.3시간에 평형에 도달하였다. 시간적으로 흡착과 탈착은 높은 대칭성을 보여주었다. 이러한 결과는 흡착과 탈착과정이 가역적인 것을 의미하며, 가스상 농도와 시료내에 남아 있는 고상(solid phase) 농도가 선형적으로 연관되어 있다(Cox et al., 2001)는 연구결과와 일

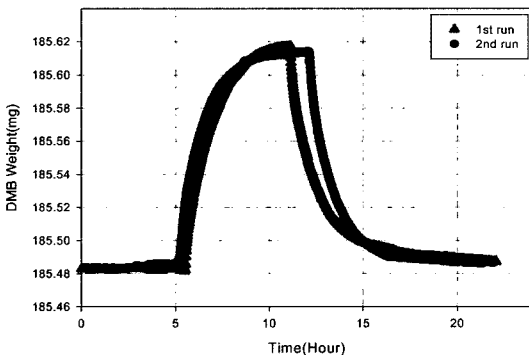


Fig. 4. Mass gain/loss of a sample during sorption/desorption process by butanol.

치하며, 본 연구에서 얻어진 확산계수(D)와 분배계수(K)가 충분히 실제 실내공간 해석에도 적용 가능함을 보여 주고 있다.

2. VOCs와 수증기의 K와 D

Table 1은 실험에 사용된 물질의 분자량등 물리적 특성과 마이크로발라스 챔버 실험에 사용되는 각 물질의 농도를 요약한 것이다. 배출량은 온도 70°C, 유입 질소량 298~307 ml/min의 조건에서 산정된 확산셀 VOCs 배출량이다. Table 2는 흡착/탈착과정에서 산정된 K, D 및 VOCs의 특성치를 나타낸 것이다. T-Decane에서 보듯이 흡착속도는 농도와 독립적인 관계를 가지며, 흡착 및 탈착시 D 값은 거의 유사한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Cox 등의 결과와도 일치한다. 그러나 바닥재외의 VOC 등과 화학반응이 쉬운 자재는 흡착과정의 확산계수 값이 탈착과정의 확산계수보다 큰 것으로 알려져 있다(Cox et al., 2001; Yang et al., 2001a).

Table 2는 3~4회의 반복실험에서 측정된 결과를 식 (3)의 왼쪽 항을 개념을 이용하여 정규화(normalize)하여 Fig. 5와 같은 곡선으로 변형한 후 우측항의 식으로 회귀곡선을 구하여 D 값을 구하였고, 유입되는 가스 농도와 시료의 무게증가를 고려하여 K를 구한 결과를 요약한 것이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 정규화된 흡착과 탈착곡선은 대칭성이 매우 강하며, 이는 확산계수 D는 유입되는 가스농도와는 독립적인 성격을 가짐을 보여주는 것이다. 반면 분자량과 증기압에 상관관계가 크게 나타

Table 1. Some relevant properties of test chemicals

Chemical	Emission rate (µg/m ³)	Molecular weight (g/mol)	Boiling Point (°C)
n-Butanol	217.5	74.1	118
Decane	42.9	142.3	173-174
Dodecane	6.9	170.3	216
Tetradecane	5.1	198.4	252

Table 2. Summarized values of D and K obtained from sorption and desorption processes

Compound	MW	Vapor pressure (mmHg at 20°C)	K	D
Water	18	17	69.2	3.1 × 10 ⁻¹²
Butanol	74	4.1	1119.5	1.98 × 10 ⁻⁰⁹
Decane	142	0.89	6023.5	1.80 × 10 ⁻⁰⁹
Dodecane	170	0.074	47321.5	6.89 × 10 ⁻¹⁰
Tetradecane	198	0.0071	110732.0	4.23 × 10 ⁻¹⁰

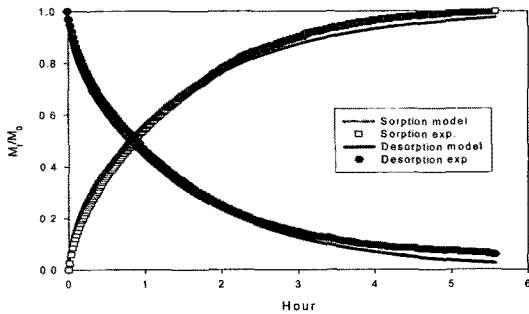


Fig. 5. Fitting transient sorption/desorption data for determination of D.

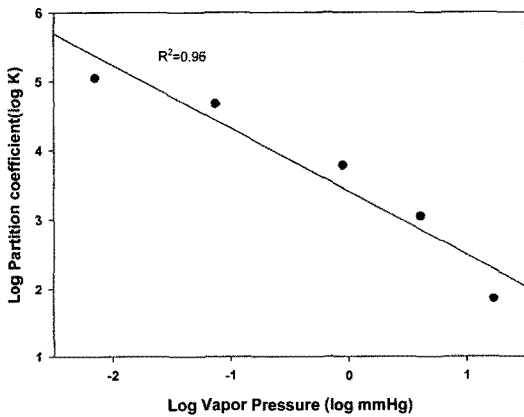


Fig. 6. Correlation of log K vs. log vapor pressure for test chemical.

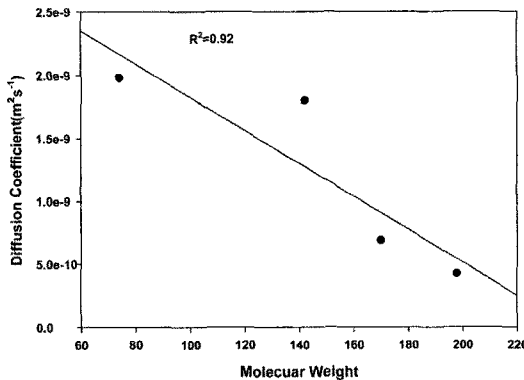


Fig. 7. Correlation of D vs. MW(Molecular Weight) for test chemicals.

남을 알 수 있다. Fig. 6은 K와 증기압과의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 7은 분자량과 확산계수와의 관계를 나타낸 것이다. 본 연구에서 측정된 VOCs의 경우 R² 값이 모두 0.90 이상으로 매우 큰 상관성을 보여 주고 있다. 이런특징은 개별 물질에 대한 특성임으로 실내오

염 현상의 경우 각각의 물질이 혼합되어 있는 경우가 우세함으로 혼합물질에 대한 정량적인 평가도 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

3. 소형챔버 방출량을 이용한 D 및 C₀의 산정방법 제안

바닥재의 질량 변화를 이용하여 확산 및 분배계수를 측정하는 방법은 시료를 얇게 만들어야 하는 단점과 시료에 남아 있는 잔류 VOCs를 모두 제거하기 힘든 기술적인 문제점이 있다. 우리나라의 경우 또한 아직까지 마이크로발라스가 사용되고 있지 않아 이를 직접 확산계수로 평가하기는 쉽지 않은 상황이다. 따라서 기존 소형챔버를 이용하여 측정된 방출량을 이용하여 각종 TVOC의 확산 및 최초 VOCs 함유량 등의 정보를 추정하는 방법이 필요하다. 본 연구에 사용된 방출량 TVOC 농도는 Supelco 사의 표준가스(100 ppb)를 흡착튜브에 50 ml/min 유량으로 5분, 10분, 15분 주입한 후 분석하여 선형성을 평가하였다. 선형성을 평가한 결과 대부분의 물질에서 R²=0.98 이상을 나타냈으며, 회수율의 범위는 85~109%를 나타내었다.

1) D와 C₀의 산정 방법

소형 챔버법으로 측정된 VOCs 방출량(emission rate, mg×m⁻²hr⁻¹)은 시료의 질량 감소율 즉 단위부피의 시료가 단위면적을 통하여 내부에 가지고 있던 VOCs를 외부로 방출하는 양을 측정하는 것임으로 방출량과 (시료무게변화)⁻¹와는 정비례관계가 성립한다. 따라서 외부로 방출되는 VOCs의 화학적 조성이 초기와 후기에 크게 변화하지 않고, 방출과정에서 VOCs 간의 반응으로 인한 극성변화가 크지 않고, 잔류 VOCs의 자재내 반응이 활발하지 않을 경우 TVOC 경우도 위의 식 (3)의 개념을 적용하여 확산계수(D) 및 초기 VOCs 함유량(C₀)을 추정할 수 있다. 김 등(2004)은 지수형태의 방출량 감쇄식이 바닥재의 방출농도를 효과적으로 예측하는 것으로 보고하고 있으며, Zhang 등(2003), Chang 등(1997), Silver *et al.*(1997)도 유사한 결과를 보고 하고 있다(Kwok *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 1999; Zhang *et al.*, 1999).

단위면적당 방출량의 개념을 이용하여 초기 VOCs 함유량 및 확산계수를 산정하기 위해서는 시료의 두께 및 크기 측정이 선행되어야 하며, 물리적인 크기가 실제 확산계수 계산시 매우 중요한 영향을 줌으로 본 연구에서는 정교한 버어니아펠리퍼스를 이용하여 5회 측정하여 평균치를 사용하였다. 소형챔버법으로 측정된 바닥재의 방출량 자료를 직접 D와 K를 산정할 수는 없다. 방출량 자료를 이용하여 확산 및 분배계수를 산정

하기 위해서는 초기 시료에 포함된 VOCs 농도를 추정하는 과정이 필요하며, 본 연구에서는 식 (4)의 개념을 응용하였으며, 방출량 감쇄곡선을 적분하여 자재에 포함된 초기 VOCs 농도(C_0)를 구하였다. 이와 같은 관계를 정리하면 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E \propto \Delta m \tag{4}$$

여기서 E[emission rate, $\text{mg} \times \text{m}^{-2} \times \text{hr}^{-1}$]는 소형 챔버법에서의 방출율을 나타내며, m[mass change, $\text{mg} \times \text{hr}^{-1}$]는 미량저울(microbalance)에서 시간에 따른 질량의 변화를 나타낸다.

$$C_0 - E = \Delta m \tag{5}$$

$$C_0 = \int_0^t E_p dt \tag{6}$$

여기서, E_p 는 방출량 예측식이다. 장미(2004)는 바닥장판재의 방출예측식을 식 (7)과 제시한 바 있다(Jang *et al.*, 2004). 일반적으로 신축 주택 건축자재에 의한 방출량의 경우 3~6개월 동안 전체 방출량의 90% 이상을 방출하는 것으로 알려져 있다. 적분을 통하여 C_0 를 구한 결과 4년 이후 값은 77.65 mg에 수렴하고 있으며, 이 값을 시료부피로 나누어 C_0 를 구할수 있다. D와 K는 Cox 등(2001)이 사용한 방법과 같은 방법을 이용하여 구하였다(Cox *et al.*, 2001).

2) D와 C_0 의 산정

적분에 사용된 예측식은 식 (7)이며, 식에서 t는 시간(day)를 나타낸다. Table 3은 이 과정을 통해 구한 TVOC와 Dodecane의 D와 C_0 값이다. Fig. 8에 확산계수를 적용한 모델식과 실제 측정 결과를 함께 비교하여 나타낸 것이다. 이 결과는 실내 건축자재에 포함된 화학물질이 대부분 시공 직후 방출된다는 김정호 등의 결과와 유사하며, TVOC는 함께 나타낸 Dodecane과 비슷한 확산을 특성가진다는 Cox 등(2001)의 기존 연구 결과와도 유사한 것으로 분석되었다(Cox *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 1999).

$$E_p = 1786.0e^{-0.0023t} \tag{7}$$

Table 3. D and C_0 for determining TVOC/dodecane during desorption on vinyl flooring

Compound	TVOC[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Dodecane[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_0	3.903×10^{13}	1.122×10^9
D(m^2/s^{-1})	9.5×10^{-12}	6.9×10^{-10}

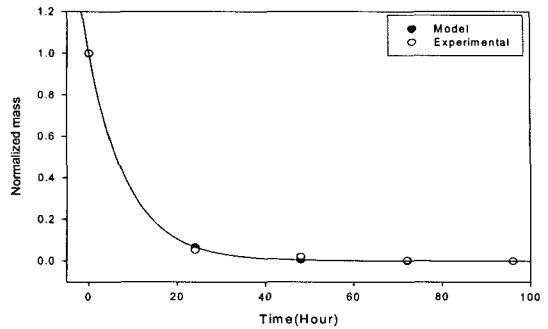


Fig. 8. Comparison with predictive model and experimental data.

V. 결 론

신축 아파트 및 신축대형 건물 바닥에 많이 사용되는 장판재의 확산 및 최초농도를 실험적인 방법을 통하여 추정하였다. 확산계수의 경우 농도 감소속도와 밀접한 관련이 있으며, 재료내 최초 VOCs 농도는 방출량/[재료의 부피]로 구할 수 있으나 기존 소형 챔버법으로 측정된 자료만 이용할 경우 직접적으로 구할 수 없다. 본 연구에서는 미량저울(microbalance)와 기존 소형챔버법을 이용하여 측정된 자료를 조합하여 D와 C_0 를 구하는 방법을 제시하였다.

미량저울을 이용하여 장판의 시간에 따른 질량 변화를 측정하였으며, 실험에 사용된 자재의 크기 및 두께를 고려하여 D 및 C_0 를 산정한 결과 D 9.5×10^{-12} , C_0 $3.903 \times 10^{13} \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 위 결과는 기존의 방출량만으로 표현될 경우 가장 좋은 등급의 자재만을 사용하여도 초기 2~3개월 동안 충분한 수준의 실내 공기질을 확보할 수 없는 문제를 설명할 수 있을 뿐 아니라, 장기 예측 및 CFD 등을 이용한 정교한 모델링에도 기초적인 정보를 제공하여 실내공기질 개선에 크게 기여할 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 Steven S. Cox 박사와 Xu Ying에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Cox, S. S., Zhao, D. and Little, J. C. : Measuring partition and diffusion coefficients for volatile organic

- compounds in vinyl flooring. *Atmospheric Environment*, **35**(22), 3823-3830, 2001.
2. Crank, J. : *The Mathematics of Diffusion*. New York: Oxford University Press, 1995.
 3. Ministry of Environment : Standard Test Methods for Indoor Air Quality'. Seoul: Korea Government of Ministry of Environment, 160, 2004.
 4. Jang, M., Kim, S.-D. and Yoon, J.-S. : 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, 2004.
 5. Jang, S.-K., Lee, S.-J., Cho, Y.-S., Joeng, K.-M. and Jeong, K.-H. : Assessment of VOCs emission characteristics from building materials such as wall paper, and adhesives using small chamber test. *Journal of Korean Society Atmospheric Environment*, **21**(2), 2005.
 6. Kim, J.-C. : Trends and control technologies of volatile organic compound. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **22**(6), 743-757, 2006.
 7. Kim, J.-H., Park, J.-S., Kim, S. and Lee, J. : Characteristics of TVOCs emission factors from chemical and natural coating materials. *Korean Journal of Environmental Health*, **30**(5), 487-493, 2004.
 8. Kwok, N. H., Lee, S. C., Guo, H. and Hung, W. T. : Substrate effects on VOC emissions from an interior finishing varnish. *Building and Environment*, **38**, 1019-1026, 2003.
 9. Silva, G. V. A., Vasoncelos, M. T., Fernandes, E. O. and Santos, A. M. S. : The effect of substrate of volatile organic compounds emissions from a varnish. *Indoor Air 99*. Edinburg Scotland: Indoor Air, 1999.
 10. Yang, X., Chen, Q., Zeng, J., Zhang, J. S. and Shaw, C. Y. : 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, 2001a.
 11. Yang, X., Chen, Q., Zhang, J. S., An, Y., Zeng, J. and Shaw, C. Y. : A mass transfer model for simulating VOC sorption on building materials. *Atmospheric Environment*, **35**(7), 1291-1299, 2001b.
 12. Zhang, J. J. and Smith, K. R. : Indoor air pollution: A global health concern. *British Medical Bulletin*, **68**, 209-225, 2003.
 13. Zhang, J. S., Nong, G., Shaw, C. Y. and Wang, J. M. : Sink characteristics of a full-scale environmental chamber and their impact on material emission testing. *The 1999 Annual Meeting* Seattle, WA: ASHRAE, 1999.