

## 환기회수 및 부하율 변화에 따른 휘발성유기화합물 농도 감쇠 예측에 관한 연구

방 승 기<sup>†</sup>, 손 장 열<sup>\*</sup>, 안 병 옥<sup>\*\*</sup>

경민대학 실용건축과, \*한양대학교 건축대학, \*\*충청대학 건축환경설계과

### Prediction of the Concentration Decay of Volatile Organic Compounds under Different Air Change Rates and Loading Factor Conditions

Seung-Ki Pang<sup>†</sup>, Jang-Yeul Sohn<sup>\*</sup>, Byung-Wook Ahn<sup>\*\*</sup>

Department of Building Services & Control System, Kyungmin College, Euijungbu 480-703, Korea

\*School of Architecture, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*\*Department of Building Service Engineering, Chungcheong College, Cheongju 363-792, Korea

(Received December 16, 2004; revision received March 17, 2005)

**ABSTRACT:** We measured the time-dependent concentration of VOCs emitted from Ondol floor, furniture, and the wall made of various building materials. After obtaining results from the previous measurement, we developed the estimation equations of the concentration decay, and obtained the estimated graphs for the concentration decay under different air change rates and loading factor conditions by using the estimated equations. We conducted our tests by applying our measurements to real residences for 110 days in the case of furniture and for 40 days in the case of the floor. We also conducted experiments in the cases of various wall materials for 7 days which totaled 10 times. We used the GC/FID for experiments for real residences according to the specified procedures of the NIOSH 1501, and carried out experiments for wall materials according to the specified procedures of the ASTM 5116-97. When conducting experiments for wall materials, we set the temperature and relative humidity at 23°C and 50%, respectively. We also set the air change rate and loading factor at 0.7/h and 1.617 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, respectively.

Our results showed that it is possible to predict properly the time-dependent concentration decay of VOCs by using logarithmic functions in both cases of experiments for real residences and for wall materials. Furthermore, we found that the concentration decay rate of VOCs increased rapidly as the air exchange rate increased while the concentration decay rate decreased as the loading factor increased.

**Key words:** Indoor air quality(실내공기질), VOCs(휘발성유기화합물), Ventilation(환기), Emission factor(방출강도), Loading factor(부하율), 가구(Furniture), 마루(Floor)

#### 기 호 설 명

† Corresponding author

Tel.: +82-31-828-7322; fax: +82-31-828-7322

E-mail address: skpang@kyungmin.ac.kr

A : 시료면적 [m<sup>2</sup>]

C<sub>t</sub> : 시간 t에서의 VOCs 농도 [μg/m<sup>3</sup>]

- $C_{bk}$  : 측정 전의 배경농도 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $C_{b,t}$  : 시간  $t$ 에서의 BLANK VOCs 농도 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $C(t_i)$  : 시간  $t_i$ 에서의 물질농도 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $EF_a$  : 단위면적당 VOCs 방출강도 [ $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ]
- $ER$  : 방출률 [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]
- $L$  : 부하율 [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]
- $k$  : 1차 감쇠상수
- $m(t_i)$  : GC/FID에서 얻은 물질의 양 [ $\mu\text{g}$ ]
- $N$  : 환기회수 [회/h]
- $R(t_i)$  : 경과시간  $t_i$ 에서의 방출률 [ $\mu\text{g}/\text{h}$ ]
- $t_{\max}$  : 최고농도의 시간,  $C_{\max}$  [h]
- $V$  : 실내체적 [ $\text{m}^3$ ]

1. 서론

최근 신축하는 주택은 대부분 바닥 마감재로 장판보다는 온돌용 마루를 많이 사용하고, 실내에 설치되는 가구는 대부분이 목재로 되어 있다. 대부분의 가구는 표면 마감재로 석유화학계 도료

를 사용하여, 실내공기를 오염시키는 휘발성유기화합물을 많이 발생시킨다.

지금까지의 실내공기질(Indoor Air Quality)에 관한 연구는 분진, CO, CO<sub>2</sub> 및 환기에 관한 연구가 대부분이었다. 최근 들어서도 휘발성유기화합물에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 대부분이 소형 챔버법을 이용하여 건축내장재 및 석유화학계제품 등에 대한 휘발성유기화합물(VOCs) 방출률(Emission Rate) 평가 및 발생강도(Emission Factor)에 대한 연구이다. 실제 건물에서도 실내의 휘발성유기화합물에 대한 단순 농도 실태 조사에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 실내의 온돌용 마루, 대형 가구 및 벽체를 구성하는 각종 재료에 대해 시간경과에 따른 휘발성유기화합물 농도를 측정하였다. 실측치를 바탕으로 시간경과에 따른 농도 감쇠 예측식을 만들고, 이 식을 이용하여 환기회수와 부하율 변화에 따른 농도 감소 곡선을 작성하였다. 연구의 흐름은 Fig.1과 같다.

2. 이론 고찰

재료에서의 휘발성유기화합물의 방출강도는 단위시간당 단위면적에서 방출되는 오염물질의 양 ( $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )을 나타내는 것으로 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$EF_a = \frac{(C_t - C_{b,t}) \times Q}{A} = \frac{(C_t - C_{b,t}) \times NV}{A} \tag{1}$$

$$= (C_t - C_{b,t}) \times q = (C_t - C_{b,t}) \times \frac{N}{L}$$

방출강도와 방출률은 다음과 같은 관계가 성립한다.<sup>(1)</sup>

$$ER = A(EF) \tag{2}$$

실내의 휘발성유기화합물의 농도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C(t_i) = \frac{M(t_i)}{V_s} - C_{bk} \tag{3}$$

오염원이 일정한 방출률을 보이고 있거나, 거의 일정하면 방출률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

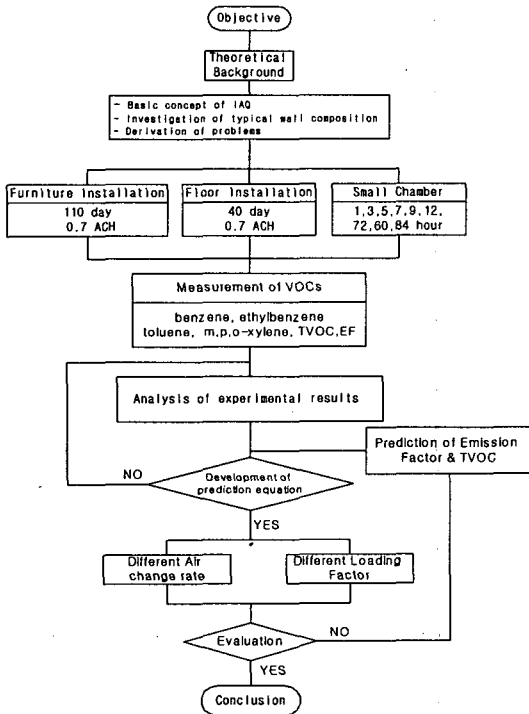


Fig. 1. Research process.

$$R(t_i) = QC(t_i) \quad (4)$$

식(4)에서  $C(t_i)$ 는 실내농도가 정상상태로 되기 전까지는 적용하기에는 다소 무리가 있으며, 최소한 실험 개시 후 환기회수가 3회 이상이 경과된 후 사용하여야 한다.<sup>(2)</sup>

수학적인 모델을 사용하여 시간의 함수로 방출률을 계산할 수 있으며, 실험기간 동안 적절한 측정값을 구하는 것이 중요한 변수가 된다. 일반적으로 시간의 함수로 나타내는 경우는 식(5)와 같이 1차 감쇠형태로 나타낼 수 있으며, 초기농도와 시간을 0으로 하면 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$R(t_i) = R_0 e^{-kt} \quad (5)$$

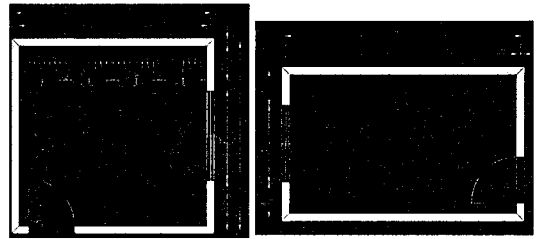
$$C_i = \frac{R_0(e^{-kt} - e^{-Nt})}{V(N-k)} \quad (6)$$

식(6)에서의  $k$ 값은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$k = (N) e^{(k-N)t_{max}} \quad (7)$$

### 3. 실험방법 및 내용

실제 주택적용 실험은 신축한 지 11년 경과한 주택에 가구설치 후 110일간, 마루설치 후 40일간 실험을 실시하였으며, 측정결과는 개별물질의 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 및 BTEX(benzene, toluene, ethylbenzene, m,p-xylene, o-xylene) 농도의 합계로 나타내었다. 또한 벽체를 구성하는 각종 재료에 대한 실험은 총 13종류의 시험체를 대상으로 하였으며, 측정결과는 개별물질 및 TVOC 농도로 나타내었다. Table 1 및 Fig.2에 측정 대상실의



(a) Furniture installation (b) Floor installation

Fig. 2 Measurement room.

Table 1 Measurement room

	Floor installation (W×D×H mm)	Furniture installation (W×D×H mm)
Size	3,000×4,500×2,150	4,200×3,600×2,300
Installed area	2,800×4,300	4,000×660×2,300
Loading factor	0.465 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	0.294 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Air change rate	0.7	

Table 2 Overview of measured specimens

No.	Specimen type (W×H×D mm)	1st finishing (liquified ceramic 300 μm)	2nd finishing
1	200×200×5, glass panel	○	-
2	200×200, gypsum board	×	-
3	200×200, gypsum board	○	-
4	200×200, gypsum board	○	Wall-paper
5	200×200×50, concrete	×	-
6	200×200×50, concrete	○	-
7	200×200×50, concrete	○	Wall-paper
8	200×200×50, concrete + mortar	×	Wall-paper
9	200×200×50, concrete + mortar	○	-
10	200×200×50, concrete + mortar	○	Wall-paper
11	200×200×50, concrete + 200×200, gypsum board	×	-
12	200×200×50, concrete + 200×200, gypsum board	○	-
13	200×200×50, concrete + 200×200, gypsum board	○	Liquified bonding agent

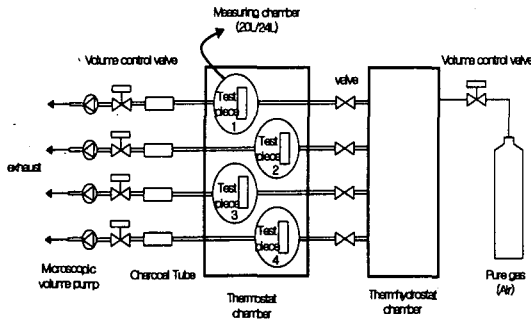


Fig. 3 HAQT (Hanyang Air Quality Test) system.<sup>(3)</sup>

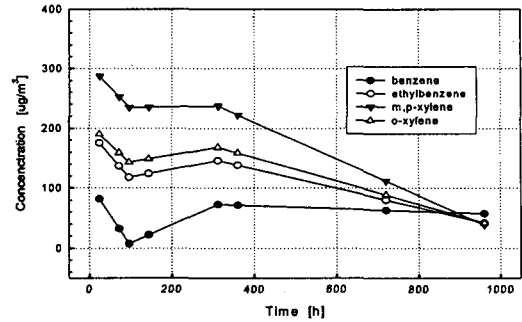


Fig. 5 VOCs concentraion (Floor).

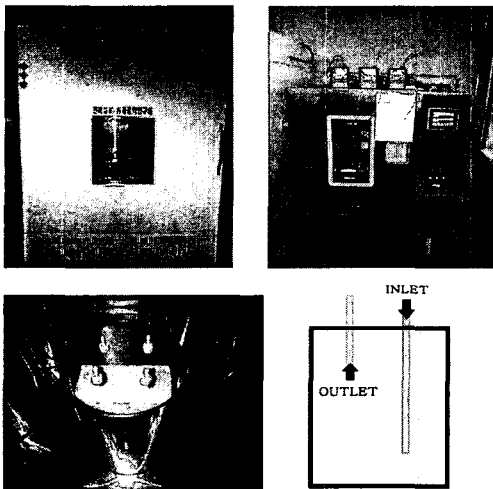


Fig. 4 Measurement chamber.<sup>(3)</sup>

개요 및 평면을 나타내었다. Table 2에는 콘크리트, 석고보드, 모르타르 및 벽지의 조합을 이용한 시험체의 종류를 표시하였다.

또한 Fig.3과 Fig.4에 시험체 시험의 실험장치 구성 및 측정장치를 나타내었다.<sup>(3)</sup>

#### 4. 측정결과 및 분석

##### 4.1 마루설치 실험결과

Fig.5에 마루를 적용한 실제주택에서 시간경과에 따른 실내의 VOCs 농도변화를 표시하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 측정 대상물질인 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene 및 m,p,o-Xylene)의 실내농도는 100시간까지는 급격하게 감소한 후 300시간까지는 다시 증가하고 그

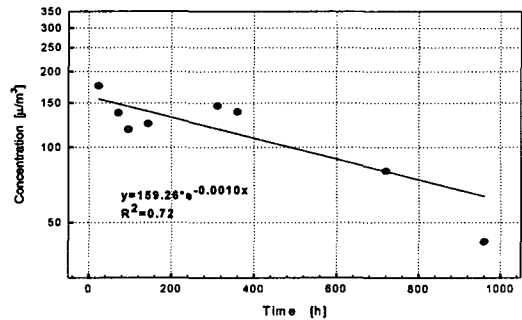


Fig. 6 Prediction of ethylbenzene decay.

이후에 서서히 농도가 감소하는 경향을 보인다. Benzene은 다른 물질과는 달리 설치 초기부터 측정 종료시까지 거의 비슷한 농도를 보인다. Benzene을 제외한 ethylbenzene 및 m,p,o-xylene은 농도는 다르나 감소경향이 거의 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 톨루엔의 경우에는 마루 설치 초기에는 다른 물질과 비슷한 농도 및 감소경향을 보였으나, 100시간 경과 후에 그 값이 증가하고, 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이는 마루 자체의 영향보다는 마루 설치시 사용한 접착제에 의한 영향으로 판단되며, 접착제의 경화에 따라 서서히 실내에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

마루를 실제 주택에 설치한 경우 시간경과에 따른 ethylbenzene의 농도 감소를 예측한 결과를 Fig.6에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 y축에 로그값을 사용하고, 지수함수를 사용하면 시간경과에 따른 ethylbenzene의 농도 감소는  $159.26 \times e^{(-0.0010 \times \text{경과시간})}$ 으로 표현할 수 있으며, 결정계수는 0.72로 비교적 높게 나타났다. 또한 m,p-xylene의 경우에도 ethylbenzene과 같은 형태의 식을 사용하여 시간경과에 따른 실내의 농

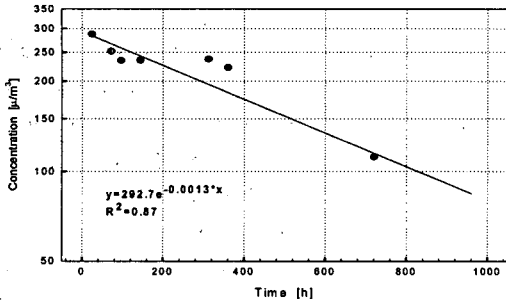


Fig. 7 Prediction of m,p-xylene decay.

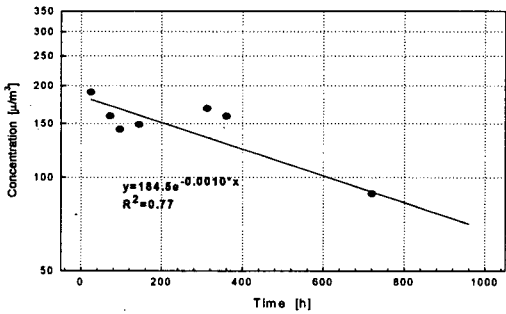


Fig. 8 Prediction of o-xylene decay.

도를 예측할 수 있으며(Fig. 7), 그 결과 예측식은  $y = 292.7 \times e^{(-0.0013 \times \text{경과시간})}$ , 결정계수는 ethylbenzene의 경우보다 높은 0.87로 그 값이 상당히 높게 나타나 실제 주택에 적용할 경우 ethylbenzene의 실내농도를 예측하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 8은 o-xylene의 시간경과에 따른 농도 감소를 예측한 것으로 지수함수를 사용하여 시간경과에 따른 실내의 농도를 예측하는 것이 가능한 것으로 나타났다. 예측식은 시간경과에 따른 실내의 농도 =  $184.5 \times e^{(-0.0010 \times \text{경과시간})}$  으로 표현할 수 있으며, 결정계수는 0.77로 m,p-xylene의 경우보다는 작게 나타났으나 실제 사용에 문제가 없을 것으로 판단된다.

#### 4.2 가구설치 실험

Fig. 9는 가구를 실제 주택에 적용한 경우, 시간경과에 따른 toluene의 농도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 톨루엔의 경우, 가구를 설치한 후 500시간이 경과된 후부터는 그 발생량이 급격히 줄어들어 안정화되는 것을 알 수 있다. 그러나 toluene을 제외한 나머지 물질의 실

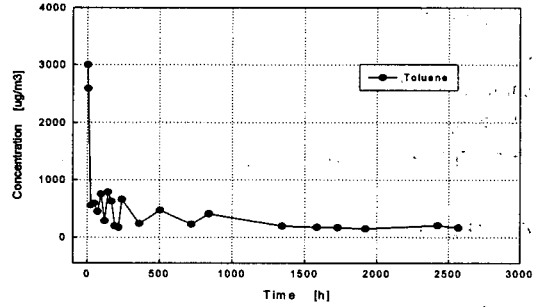


Fig. 9 Toluene concentration (Furniture).

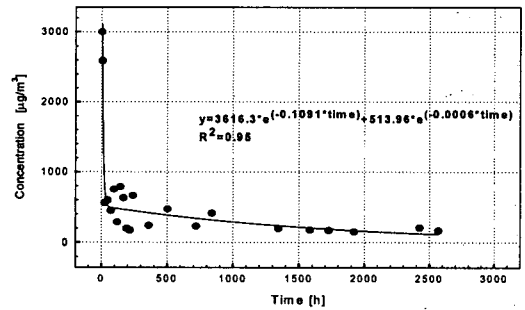


Fig. 10 Prediction of toluene.

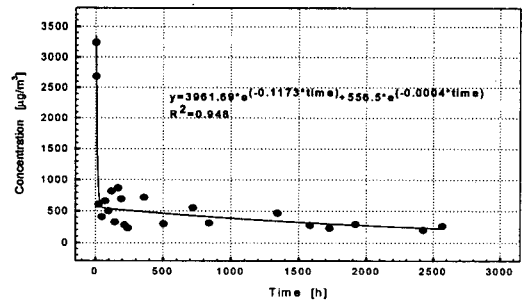


Fig. 11 Prediction of BTEX.

내농도는 측정기간 동안 발생이 거의 없었다.

Fig. 10은 실내에 가구를 설치한 경우 시간경과에 따른 toluene의 농도 감소를 예측한 것으로 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 예측식은  $3616.3 \times e^{(-0.1091 \times \text{경과시간})} + 513.96 \times e^{(-0.0006 \times \text{경과시간})}$  으로 표시할 수 있으며, 이때 결정계수는 0.95로 매우 높게 나타났다. 따라서 실내에 유사한 부하율을 가진 가구를 설치하고 환기회수가 비슷한 조건일 경우, 시간경과에 따른 농도 감소를 예측할 때 사용 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 BTEX 농도 합계의 감소를 시간경과에 따라 예측한 결과를 나타낸 것으로, 그림에서

와 같이 예측식은  $3961 \times e^{(-0.1173 \times \text{경과시간})} + 556.5 \times e^{(-0.0004 \times \text{경과시간})}$ 로 표현할 수 있으며, 결정계수도 toluene의 경우와 같이 0.95로 매우 높게 나타났다. 따라서 실내의 BTEX 농도 합계의 감소를 예측할 경우에 사용이 가능할 것으로 판단된다.

4.3 시험체 실험

Fig. 12는 콘크리트에 석고보드를 부착한 시험체 7의 시간경과에 따른 BTEX와 TVOC 농도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 일정한 비율로 감소하지는 않았지만 시간이 흐름에 따라 점차적으로 TVOC가 감소하여  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 안정되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 13은 시험체 6,7,8의 시간경과에 따른 TVOC의 변화를 나타낸 것으로 콘크리트에 모르타르와 비닐 도배지를 부착한 후 세라믹 코팅을 하지 않은 시험체 8의 경우, 시간의 감소에 따라 감소하는 경향을 보였으나, 액상 세라믹을 코팅한 시험체 6,7은 3일이 지난 후 그 양이 감소 또는 증가하는 것으로 나타났다. 또한 동일한 조건에서 도

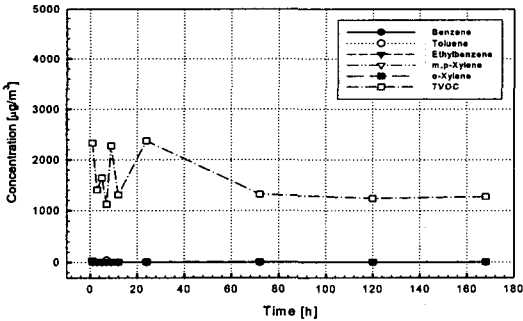


Fig. 12 VOCs concentration (specimen 7).

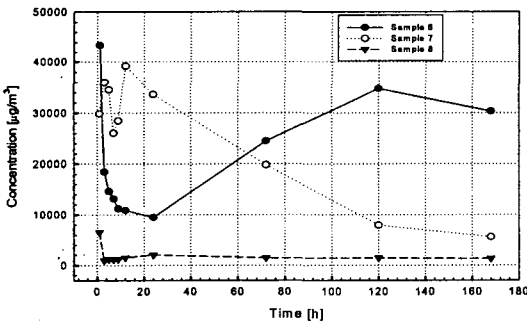


Fig. 13 TVOC concentraion (specimen 6,7,8).

배지를 부착한 경우와 부착하지 않은 경우를 비교하기 위하여 시험체 9와 시험체 10을 비교한 결과 Fig. 14에서 볼 수 있는 바와 같이 도배지를 부착하지 않은 시험체 9가 시간이 경과함에 따라 발생하는 TVOC의 양이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 도배지 부착시 사용하는 도배용 본드의 영향에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 15는 콘크리트에 도배지를 부착한 시험체 7의 시간경과에 따른 TVOC 농도 감소를 예측한 것으로, y축에 로그값을 사용하여 직선화하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 예측식은  $34906 \times e^{(-0.0093 \times \text{경과시간})}$ 으로 나타낼 수 있었으며, 결정계수는 0.83으로 비교적 높게 나타나 동일한 구조체로 이루어진 실내에 적용할 경우 TVOC 농도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 환기회수, 부하율 변화에 따른 VOCs 농도 예측

4.4.1 가구실험

Fig. 16은 실내에 가구를 설치한 경우 부하율을

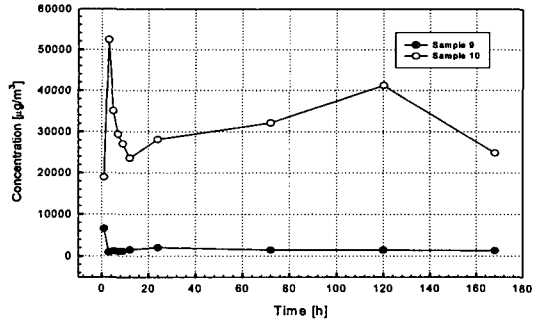


Fig. 14 TVOC concentration (specimen 9,10).

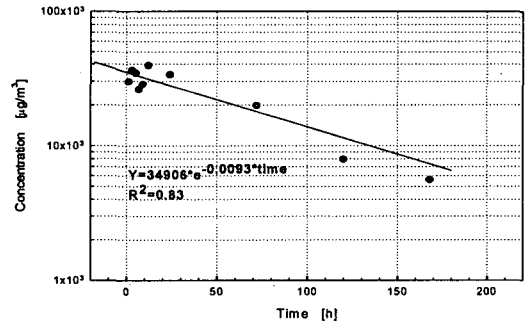


Fig. 15 Prediction of TVOC decay (specimen 7).

0.294로 고정하고 환기회수를 변화시킬 경우 시간경과에 따른 실내의 toluene의 농도 감소를 예측한 것이다. y축에 로그값을 사용하여 나타낼 수 있으며, 환기회수 증가에 따라 실내의 toluene 농도 감소시간도 짧아지는 것을 알 수 있다.

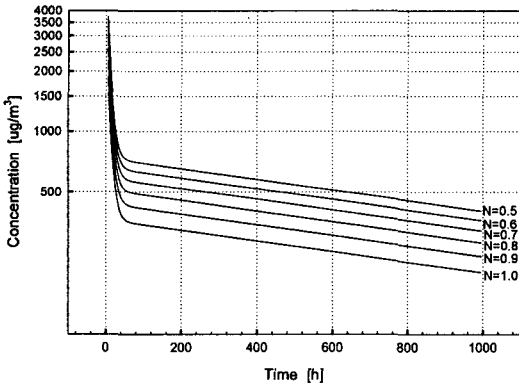


Fig. 16 Prediction of toluene decay.

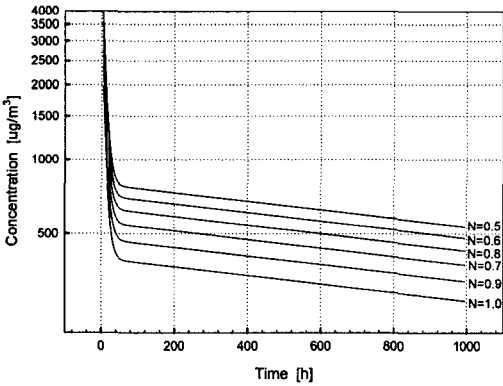


Fig. 17 Prediction of BTEX decay.

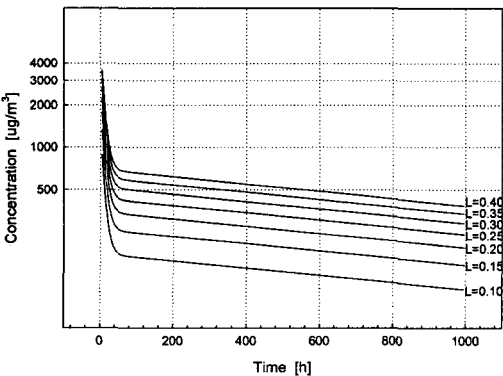


Fig. 18 Prediction of toluene decay.

Fig. 17은 BTEX 농도의 합계를 이용하여 환기회수변화에 따른 실내의 농도 감소를 예측한 것이다. Fig. 18은 환기회수를 0.7회/h로 고정하고 부하율을 0.10~0.40 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>로 변화시킬 경우, 실내의 toluene 농도 감소를 시간경과에 따라 예측한 것으로 부하율이 증가하면 실내의 toluene 농도 감소시간은 느려지는 것을 알 수 있다.

#### 4.4.2 마루실험

Fig. 19는 부하율이 0.465 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>인 마루를 실내에 설치하고, 환기회수가 0.5~1.0회/h인 경우 실내의 ethylbenzene의 농도 감소를 예측한 것이다. 환기회수가 증가하면 실내의 ethylbenzene의 농도 감소시간은 짧아지는 것으로 나타났다.

Fig. 20은 환기회수 변화에 따른 m,p-xylene의 농도 감소를 예측한 것이며, Fig. 21은 o-xylene의 시간경과에 따른 농도 감소를 예측한 것이다.

Fig. 22는 실내에 마루를 설치했을 경우 환기회

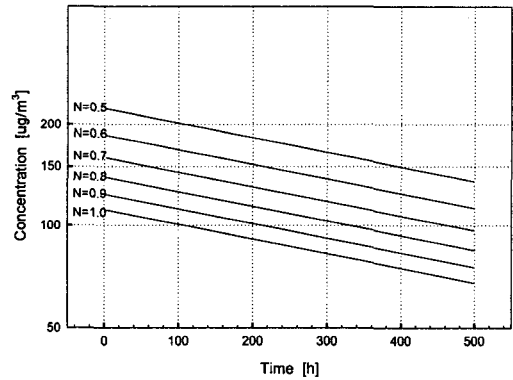


Fig. 19 Prediction of ethylbenzene.

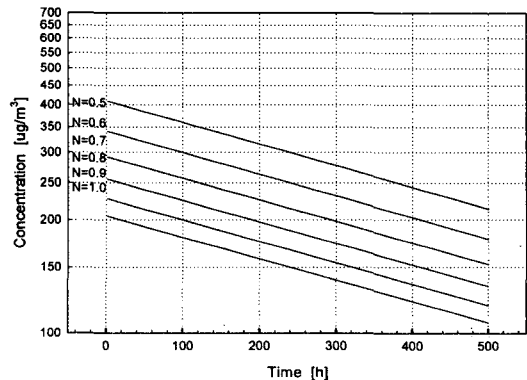


Fig. 20 Prediction of m,p-xylene decay.

수를 0.7회/h로 고정하고 마루의 부하율이 0.25~0.60인 경우 실내 ethylbenzene의 시간경과에 따른 농도 감소를 예측한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 부하율 증가에 따라 실내의 ethylbenzene의 농도 감소시간도 점차 길어지는 것으로 나타났다.

Fig. 23은 부하율 변화에 따른 m,p-xylene의 농

도 감소를 예측한 결과이며, Fig. 24는 시간경과에 따른 o-xylene의 농도 감소를 예측한 것이다.

4.4.3 시험체 시험

Fig. 25는 콘크리트에 도배지를 부착한 경우 부하율을 고정하고 환기회수 변화에 따른 TVOC의 농도 감소를 예측한 것이며 Fig. 26은 환기회수를

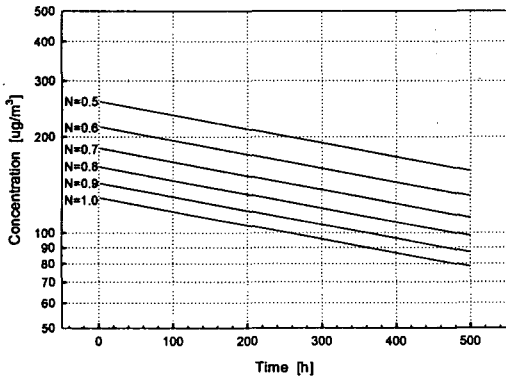


Fig. 21 Prediction of o-xylene decay.

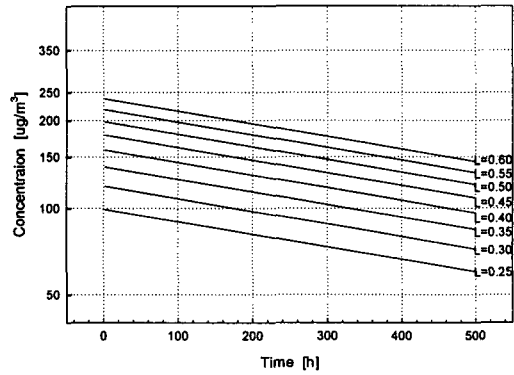


Fig. 24 Prediction of o-xylene decay.

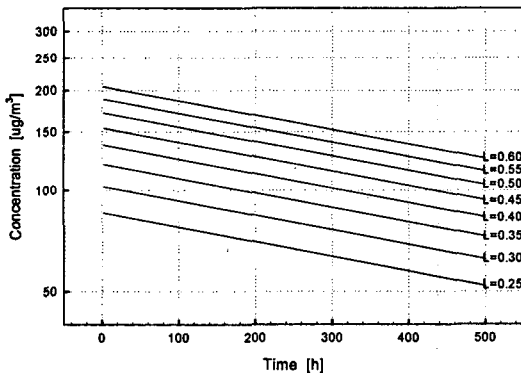


Fig. 22 Prediction of ethylbenzene decay.

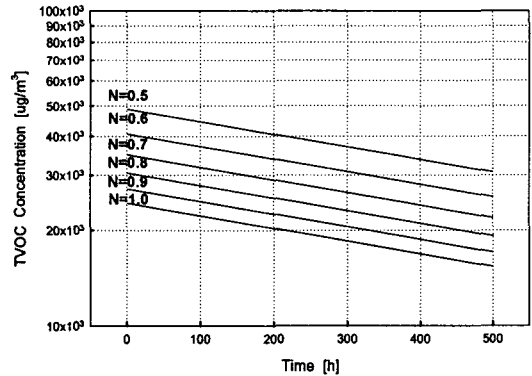


Fig. 25 Prediction of TVOC decay.

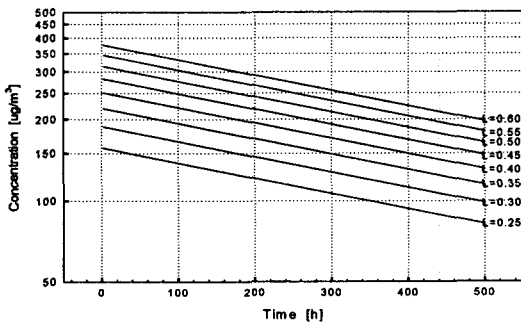


Fig. 23 Prediction of m,p-xylene decay.

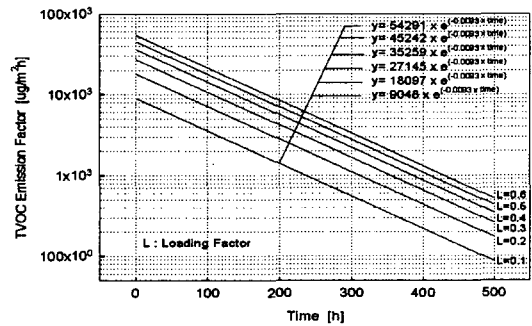


Fig. 26 Prediction of TVOC emission factor.



고정하고 부하율 변화에 따른 TVOC 방출 강도 (TVOC Emission Factor)를 예측한 결과를 나타낸다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 온돌용 마루와 실내에 설치하는 대형 가구를 중심으로 시간경과에 따른 VOCs 농도를 측정하고, 실측치를 바탕으로 예측식을 작성하였다. 예측식을 이용하여 환기회수와 부하율 변화에 따른 농도 감소 그래프를 개발한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실제 주택에 마루를 설치하고 시간경과에 따른 BTEX(benzene, toluene, ethylbenzene, m,p,o-xylene)의 농도 감소를 예측한 결과 예측식은 지수함수로 표현할 수 있다.

(2) 실내에 부하율이  $0.294 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 인 가구를 설치하고 환기회수를 변화에 따른 실내 toluene의 농도 감소를 예측한 결과, 환기회수 증가에 따라 실내의 toluene 농도 감소시간도 짧아지는 것을 알 수 있다.

(3) 환기회수가 0.7회/h인 실내에 마루를 설치한 경우 마루의 부하율을 0.25~0.60으로 변화시

키면 ethylbenzene은 부하율 증가에 따라 농도 감소시간이 점차 길어지는 것으로 나타났다.

추후의 연구과제는 다양한 재료를 실제 주택에 적용한 후 예측식의 형태를 좀더 단순화하고 일반화시켜 보다 정밀한 예측식의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. ASTM D 5116-97, Small-Scale Environmental Chamber Determination of Organic Emissions From Indoor Materials/Products, pp.10-11.
2. ASTM D 6670-01, Standard Practice for Full-Scale Chamber Determination of Volatile Organic Emissions from Indoor Materials/Products, p. 17.
3. Pang, S. K., Sohn, J. Y., Baik, Y. K. and Cho, H., 2004, Manufactured chamber for measuring pollutant release and measuring chamber production & VOCs releasing characteristics of lightweight panel, J. Korean. Soc. Living Environ. Sys., Vol. 11, No. 1, pp. 26-34.