

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 26, No. 1, 2006

실내 수증기 발생량 예측을 위한 습기 전달 모델의 검증에 관한 연구

이동권*, 김의종*, 최원기*, 서승직**

*인하대학교 대학원 건축학부 (inhaloveall@hanmail.net), (kim_with_jesus@yahoo.com), (iachoi7205@hotmail.com)

**인하대학교 건축학부 교수(energeti@inha.ac.kr)

Verification of the Validity of Moisture Transfer Model for Prediction of Indoor Moisture Generation Rate

Lee, Dong-Kweon*, Kim, Eui-Jong*, Choi, Won-Ki*, Suh, Seung-Jik**

*Dept. of Architecture, Graduate School, Inha University (inhaloveall@hanmail.net),
(kim_with_jesus@yahoo.com), (iachoi7205@hotmail.com)

**Professor, Dep. of Architectural Engineering, Inha University (energeti@inha.ac.kr)

Abstract

Moisture in a building is one of the most important variables influencing building performance, human health, and comfort of indoor environment. However, there are still lacks in the knowledge of understanding the moisture problem well and controlling moisture. Accordingly, in order to provide the fundamental data to control moisture contents in the indoor air, this study was to predict moisture contents transferred through building envelopes and indoor moisture generation rate. Moisture transfer model was made by physical relations in each node, and the indoor moisture generation rate was gained by comparing the model with experimental analyses. From the study, we found out that moisture generation rate was critical and day-periodic, so that we predicted the indoor moisture content by substituting the constant value gained from the average in a day for the moisture generation rate.

Keywords : 습기 전달 모델(Moisture Transfer Model), 실내 수증기 발생량(Indoor Moisture Generation Rate), 수증기량(Moisture Content)

기 호 설 명

- c : 수증기량 [kg/m³]
- dt : 계산 시간 간격
- D : 수증기 확산 계수 [m²/s]
- G : 수증기 발생량 [kg/m³ · h]
- h_m : 표면 습기전달 계수 [m/s]
- m : 질량 [kg]
- n : 환기횟수 [회/h]
- p : 압력 [kPa]
- R : 기체상수 [8.314×10^{-2} m³ · bar/kmol · K]
- V : 체적 [m³]

1. 서 론

오늘날 사람들의 생활은 대부분 실내 공간에서 이루어지기 때문에, 실내 공간의 쾌적한 환경에 관한 관심이 날로 높아지고 있다. 실내 쾌적과 관련된 환경적 요소로는 온도, 습도, 기류, MRT, 공기 질, 소음, 빛 등이 있으며 이중에서도 습도는 온도, 공기 질과 같은 쾌적 변수와 깊은 관련이 있다고 할 수 있다. 높은 습도는 건물 구성 재료의 부식과 같은 구조적 문제를 야기하기 때문에 건물의 내구성을 제한하는 주요한 요소들 중에 하나이다. 또한 건물 외피를 통한 습기 이동은 미생물의 성장과 같은 실내 공기질의 악화를 초래할 수 있다. 또한 상대습도 70%이상이면 곰팡이가 성장할 가능성이 크므로 실내에서 습기 문제를 해결하는 것은 건물의 내구성을 향상시키고 미생물과 곰팡이의 성장을 제한할 수 있다는 점에서 반드시 필요하다.

그렇지만, 이와 같이 실내의 쾌적 요소로서 습기의 중요성에도 불구하고, 습기와 관련된 연구는 많이 부족한 것이 사실이다. 그 이유로는 대부분의 건물 외피는 다공질의 재료로 이루어져 있기 때문에 습기 전달 과정이 매우 복잡한 형태로 이

루어지며, 재료의 물성치에 관한 연구도 미흡하기 때문이다. 또한 습기 문제는 열전달, 습기전달, 공기유동, 화학적, 생물학적 반응과 같은 복합적인 요소의 작용으로 일어나기 때문에 이것을 총체적으로 이해해야 하는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 잘 알려진 습기 전달 이론을 중심으로 자연 상태의 대상 건물을 모델링을 한 후 실험을 통하여 모델링하기에 한계가 있는 수증기 발생량과 관련한 패턴을 알아보고 이에 대한 유효성을 검증하고자 한다.

2. 이론 분석

건물에서의 습기전달을 위한 수학적 모델링의 과정은 다음과 같은 과정으로 일반화 된다. ①건물 외피에서 습기 전달 모델 방정식을 수립한다. ②건물 외피와 실내 공기 사이에서의 습기 전달 모델 방정식을 수립한다. ③수치해석을 통해 경계 조건으로 표현되는 외부 기상조건에 따른 비정상 상태의 실내 수증기량을 구한다. 그리고 계산을 단순화하기 위한 기본 가정은 다음과 같다.

- (1) 벽체, 지붕, 바닥의 습기전달은 두께 방향의 1차원으로 보며, 각부 재료는 동일하다.
- (2) 실내공간을 단일 존으로 보고 수증기량은 위치에 대해 일정하다고 본다.
- (3) 계산시간 간격은 1분이며, 10분 간격 기상데이터의 보간값을 사용한다.
- (4) 대류 습기 전달률은 Lewis Relation 에 의해 구한다.

2.1 습기 전달 방정식

1) 구조체

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial c_w}{\partial x} \right) \quad (1)$$

c_w [kg/m³]는 이상기체 방정식에 의해 다음과

같다.

$$c_w = \frac{p_i W}{RT_i} \quad (2)$$

D_w 는 재료의 습기 확산 계수 [m^2/s]로 다음과 같다.

$$D_w = \frac{D_v}{\rho_m C_m} \quad (3)$$

구조체의 외표면 및 실내측에 대한 경계조건은 다음과 같이 설정 할 수 있다.

$$D_w \frac{\partial c_w}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{m,w}^{out} (c_{out} - c_{so}) \quad (4)$$

$$D_w \frac{\partial c_w}{\partial x} \Big|_{x=M} = h_{m,w}^{in} (c_{in} - c_{si}) \quad (5)$$

여기서, $h_{m,w}^{out}$, $h_{m,w}^{in}$ 는 표면 습기 전달 계수 [m/s]로 Lewis Relation에 의해 다음과 같다.

$$h_m = \frac{h_t}{\rho_a C_p} \quad (6)$$

(2) 실내공기

$$V \frac{dc_{in}}{dt} = M_1 + M_2 + M_3 \quad (7)$$

M_1 : 벽체로부터의 수증기 전달량 [kg/s]

M_2 : 환기에 의한 수증기 전달량 [kg/s]

M_3 : 실내 수증기 발생량 [kg/s]

2.2 실내 수증기 발생량

실내 습도는 실내 온도, 실내 수증기 발생량, 외기 기상 조건, 건물 외피 구조로 부터 영향을 받는다. 특히 실내 수증기 발생량은 기존의 건물

에서 다른 요소에 비해 큰 영향을 미치는 인자라 할 수 있다. 실내 수증기 발생은 거주자의 활동 (목욕, 세척, 호흡 등)과 구조체의 흡습, 방습으로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 이러한 수증기 발생량 중 재실자 영향이 적고 건물의 환경인자로서 외피와 관련한 습기의 기초적인 연구를 위해 구조체의 흡방습과 관련한 부분만을 수증기 발생량으로 보고 연구를 진행하였다.

실내 수증기 발생량을 계산하기 위해 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M_3 = V \frac{dc_{in}}{dt} - M_1 - M_2 \quad (8)$$

M_3 를 계산하기 위해, 실내 수증기량 c_{in} 에 대한 시간의 도함수 dc_{in}/dt 의 계산이 필요하다. 수증기 발생원이 수증기를 방출할 때, 수증기량은 지수 함수 증가를 하고, 방출을 멈췄을 때, 지수 함수 감소를 한다. 이는 오염원 발생원에 따른 오염원의 농도를 예측하는 방법과 유사하며 이와 관련하여 Bennett et al.¹⁾이 제안한 Stirling interpolation polynomial fitting을 이용하여 본 논문에서는 실내 수증기 발생량을 평가를 위한 미분항을 계산하였으며 다음과 같다.

$$\left[\frac{dc_{in}}{dt} \right]_{t=t_0} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\Delta c_{in,-1} + \Delta c_{in,0}}{2} - \frac{1}{6} \frac{\Delta^3 c_{in,-2} + \Delta^3 c_{in,-1}}{2} + \frac{1}{30} \frac{\Delta^5 c_{in,-3} + \Delta^5 c_{in,-2}}{2} + \dots \right) \quad (9)$$

1) Bennett et al., Estimating the contribution of individual work tasks to room concentration : method applied to embalming, American Industrial Hygiene Association Journal, No. 57, pp. 599~609, 1996

방정식(8)을 계산하는데 있어서 벽체로부터 전달되는 비정상 수증기량 M_1 값을 알아야한다. 그러나 본 논문에서는 $M_1=0$ 으로 가정하고 수증기 발생량을 계산한 후 실내 수증기 변화량을 예측하고자 한다.

2.3 시뮬레이션

위에서 제시한 각 식의 이산화방법은 양해법(Explicit Method)을 사용하였으며 각 절점별 시간간격은 60초를 기준으로 하였다. 사용된 기상데이터는 실험과정에서 얻어진 기상자료를 보간하여 사용하였으며 프로그램 작성은 포트란을 이용하였다.

3. 실증실험

3.1 습기 모델 예비 실험

이 실험은 수증기 발생이 없는 자연상태에서의 수증기 변화를 측정하는 것으로 습기 모델에서 수학적으로 묘사하기 어려운 구조체 흡방습의 발생 경향을 알아보고자하는 예비 실험이다. 실험은 8월 29일부터 9월 4일까지 7일간 실시하였으며, 실험모델에 대한 외기온도, 상대습도, 풍속 등의 기상 데이터를 10분 간격으로 측정하였다. 구조체 실내 온도, 상대습도와 수증기량은 디지털 온습도계(TH-CALC 8722)를 이용하여 6일간 측정

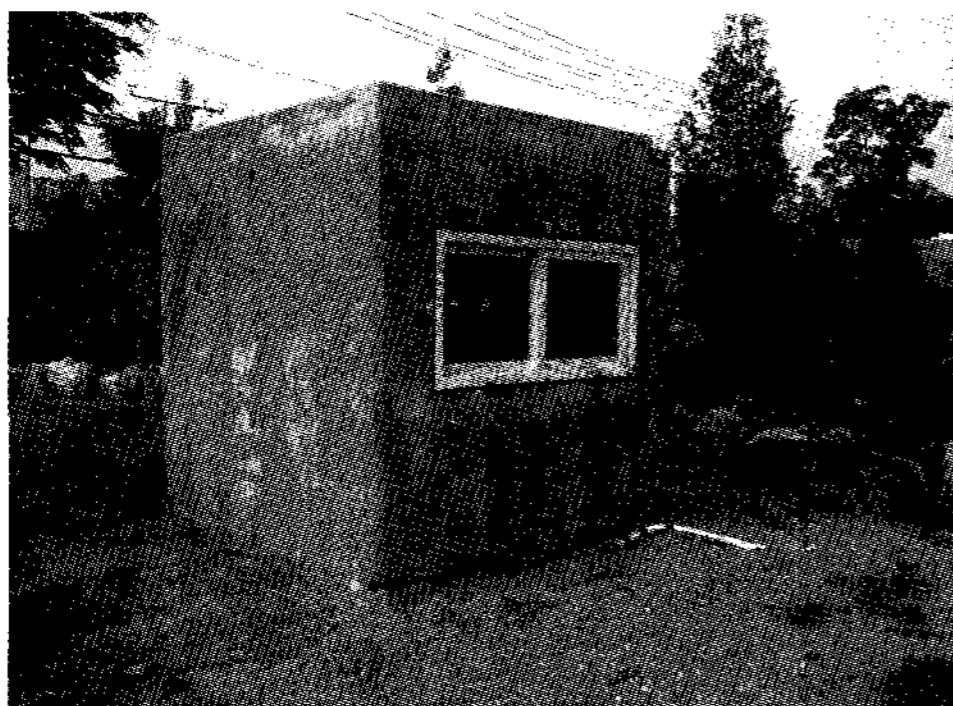


그림 1. 실험 건물

하였으며 실험체의 평균 환기횟수는 $0.4/h = 1.1 \times 10^{-4}/s$ 로 가정하였다. 그림 1은 실험이 행해진 실험건물을 나타낸 것으로 두께 0.15m의 철근콘크리트 단일 재료로 구성되었으며 건물의 크기는 1.7m×1.7m×2.1m(높이)이다.

3.2 수증기 발생량 상수화 평가 실험

3.1의 예비 실험을 통해 얻어진 결과를 기반으로 수증기 발생량을 프로그램내에서 상수값으로 입력했을 때의 습기 모델의 유효성을 확인하기 위하여 9월 9일부터 20일까지 12일간 인천 도화동에 위치한 철근 콘크리트 건물에서 분석을 실시하였다. 대상 공간의 크기는 3.47m×2.73m×2.34m이고, 바닥면적은 9.47m²이다. 대상 건물은 지상 5층의 건물이지만, 분석을 위한 대상 공간은 옥탑에 위치하고 북측면만 인접실에 연결되고 다른 외벽은 외기에 노출되어 있다. 실험기간 동안은 모델 건물은 비거주 공간이었기 때문에 거주자의 활동이나 기기에 의해 발생하는 열량이나 수증기량은 고려되지 않았다. 그림 2는 실험 대상의 평면을 나타낸 것이다.

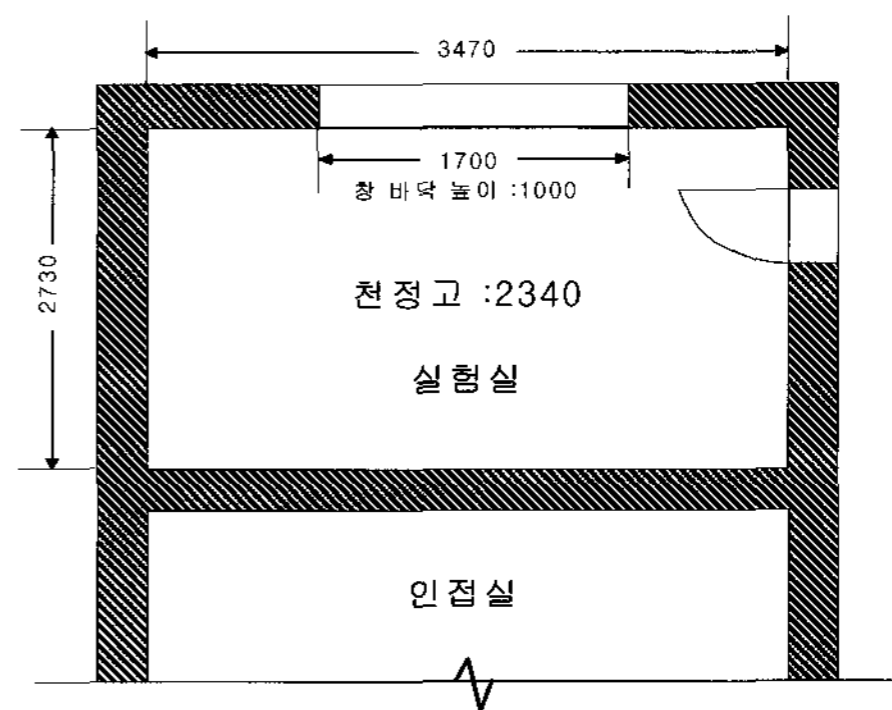


그림 2. 수증기 발생량 적용 실험을 위한 실험실 평면

그림 3은 모델 건물의 벽체 재료의 구성을 나타낸 것으로, 인접실과 맞닿아 있는 북측면의 내벽과 바닥면 벽체에 의해 전달되는 열량과 수증기

량은 고려하지 않았다. 표 1은 외벽과 지붕의 벽체 재료에 대한 물성치를 나타낸다.

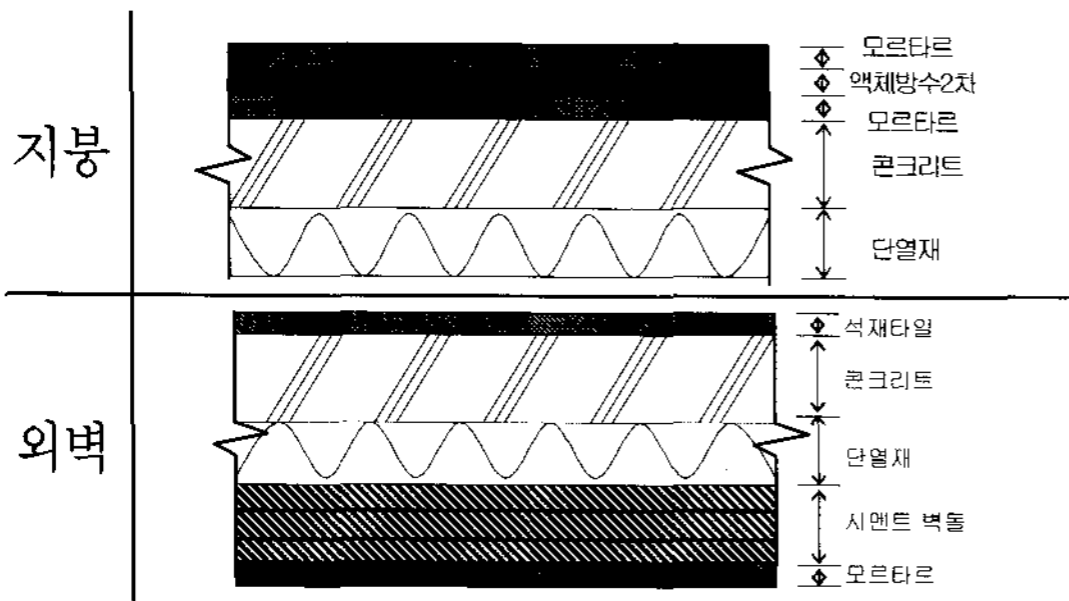


그림 3. 실험 대상 건물의 벽체 재료 구성도

표 1. 재료의 물성치

구분	열전도율 (w/mK)	비열 (J/kgK)	밀도 (kg/m ³)	투습율 (ng/(s m Pa))	두께 (m)	
지붕	모르타르	0.513	900	1915	800	0.02
	액체방수 2차	0.5	1000	2400	0	0.02
	모르타르	0.513	900	1915	800	0.02
	콘크리트	1.6	850	2200	4.7	0.12
	단열재	0.025	1470	28.6	1.7	0.08
외벽	석재타일	0.723	840	2500	6.9	0.02
	콘크리트	1.6	850	2200	4.7	0.15
	단열재	0.025	1470	28.6	1.7	0.05
	시멘트 벽돌	0.733	800	2315	137	0.10
	모르타르	0.513	800	1915	800	0.02

4. 결과 및 분석

4.1 습기 모델 예비 실험 결과

본 장은 앞서 언급한 대로 습기 모델에서 수학적으로 묘사하기 어려운 구조체 흡방습의 발생 경향에 관한 예비실험 결과들이다.

그림 4은 구조체의 흡·방습에 의한 실내 수증기 발생량을 고려하지 않은 경우, 실내 수증기량 분포를 나타낸다. 즉, 식 (8)에서 $M_3 = 0$ 으로 가정했을 때의 수증기량 분포이다. 구조체를 통한 수증기 확산은 기존의 연구에서 TenWhole은 $0.068 \times 10^{-6} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로, Xiadshu Lu는 $0.03 \times 10^{-6} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 분석하였다. 이 값은 실내

수증기량의 변동에는 큰 영향을 미치지 않는 적은 값이기 때문에 측정값과 계산값과의 차이는 수증기 발생량에 의존한다고 생각할 수 있다.

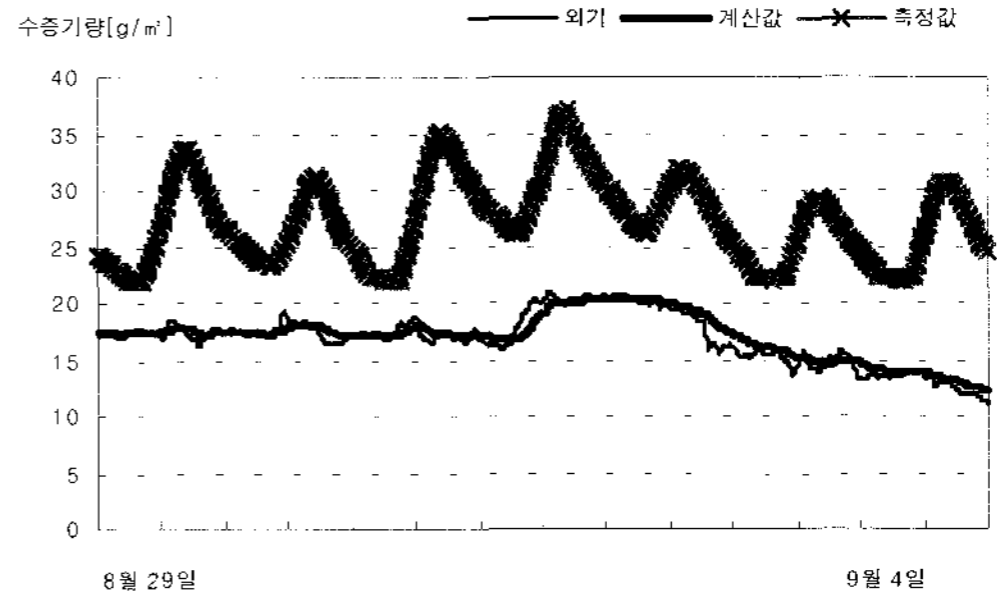


그림 4. 수증기 발생량을 고려하지 않은 경우, 실내 수증기량 분포

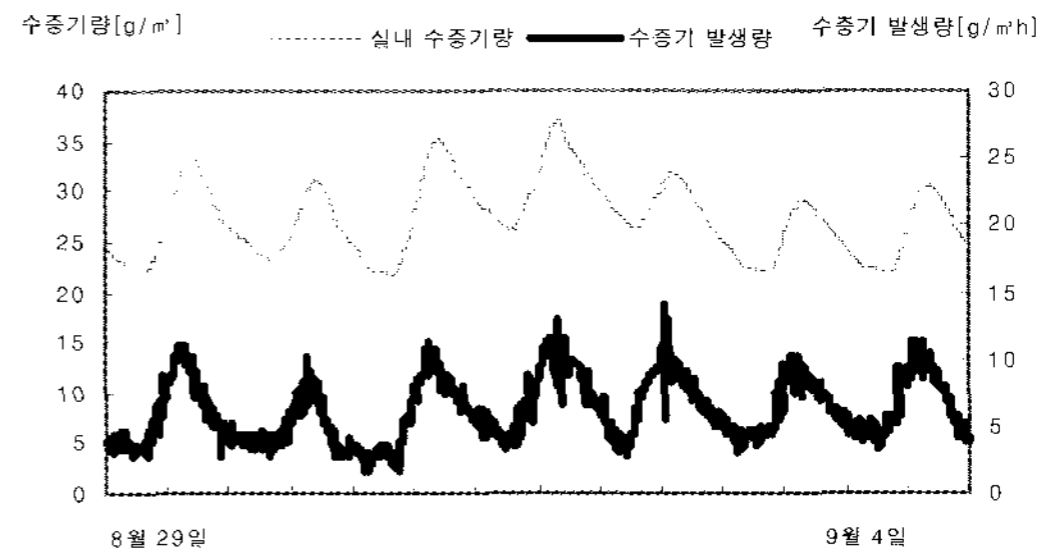


그림 5. 측정된 실내 수증기량과 계산된 실내 수증기 발생량

그림 5는 측정을 통해 얻은 실내 수증기량을 이용하여 구조체의 흡·방습에 의한 실내 수증기 발생량을 계산한 결과이다. 거동에 대해서는 실내 수증기 발생량과 실내 수증기량이 유사하며 하루 주기로 실내 수증기량이 변화하는 것을 알 수 있다. 측정 기간 동안 구조체의 흡·방습에 의한 실내 수증기 발생량의 평균값은 $6.2 \text{ g/m}^3 \cdot \text{h} = 10.45 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ 이다. 기존의 연구에서 Xiadshu Lu는 2명의 성인과 1명의 어린이가 거주하는 건물에서 수증기 발생량은 $57 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$, TenWhole은 1명이 거주하는 건물에서 수증기 발생량은 $63 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ 라고 평가하였다. 본 연구에서 건물은

거주자의 활동에 의한 실내 수증기 발생량은 고려하지 않았기 때문에, 이들 값보다는 적다는 것을 알 수 있다.

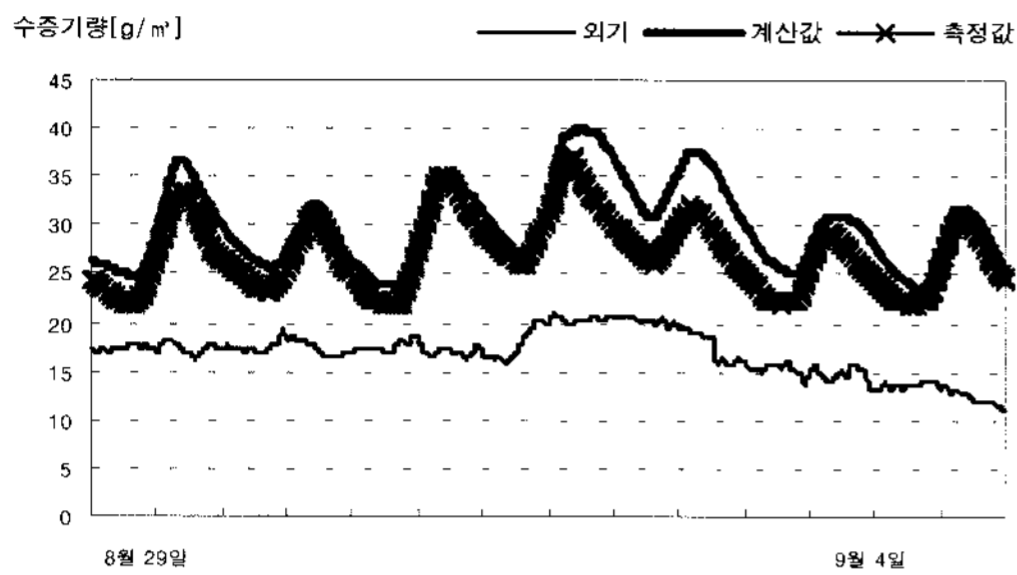


그림 6. 수증기 발생을 고려한 경우, 실내 수증기량 분포

그림 6은 수증기 발생량을 계산에 포함시킨 후 분석 기간 동안의 실내 수증기량 분포를 나타낸다. 측정값과 계산값이 서로 유사한 거동을 보이고 있으며, 측정값의 평균값은 27.3 g/m³이고, 계산값의 평균값은 30.0 g/m³이다. 평균값이 차이는 2.7 g/m³ 정도로 계산값이 측정값에 대해 10%의 오차를 보이고 있다.

이상의 결과는 건물의 실내 수증기량과 상대습도를 보다 정량적으로 계산하기 위해서는 구조체의 흡·방습에 의한 실내 수증기 발생량을 고려해야 한다는 것을 보여주고 있다.

4.2 수증기 발생량 상수화 실험 결과

예비 실험 결과를 통해서 볼 수 있듯이 구조체의 흡방습을 고려하지 않았을 때의 습기 모델은 실험값과 큰 차이가 발생하게 된다. 그러나 이의 해결을 위해 연중 실험을 하는 것은 큰 무리가 따를 뿐 아니라 습기 모델 이용에 큰 의미가 없어지게 된다. 따라서 예비 실험에서 수증기 발생량이 하루주기의 패턴인 것을 이용하여 하루 동안의 수증기 발생량 평균값을 수증기 발생 상수로 프로그램에 입력하여 이의 결과를 실험값과 비교하였다. 그림 7과 8은 이러한 상수화 검증실험(2005년 9

월 9일~20일)의 결과를 나타낸 것으로 그림 7은 수증기 발생량을 고려하지 않았을 때의 계산값과 측정값의 차이를 나타내고 있다.

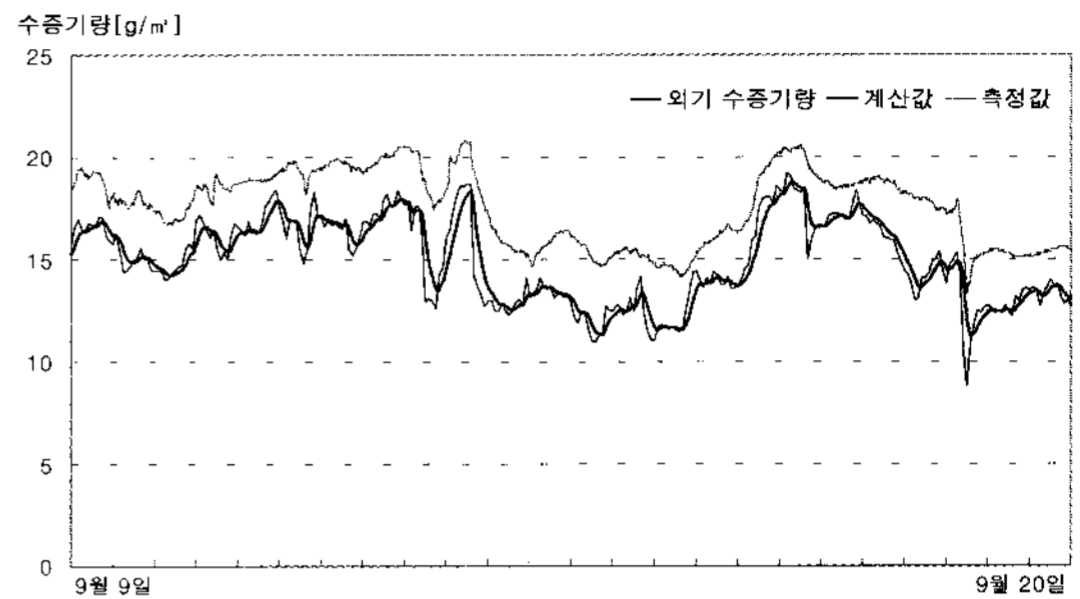


그림 7. 수증기 발생량을 고려하지 않은 경우, 실내 수증기량 분포

실험이 행해진 첫날인 9월 9일 하루 동안의 실내 수증기 발생량을 평균하여 이를 습기 모델에서의 수증기 발생량 상수로 대입했을 때 실험기간 전체에 걸쳐서 실험값과 계산값과의 차이를 비교하였으며 그 내용은 그림 8과 같다.

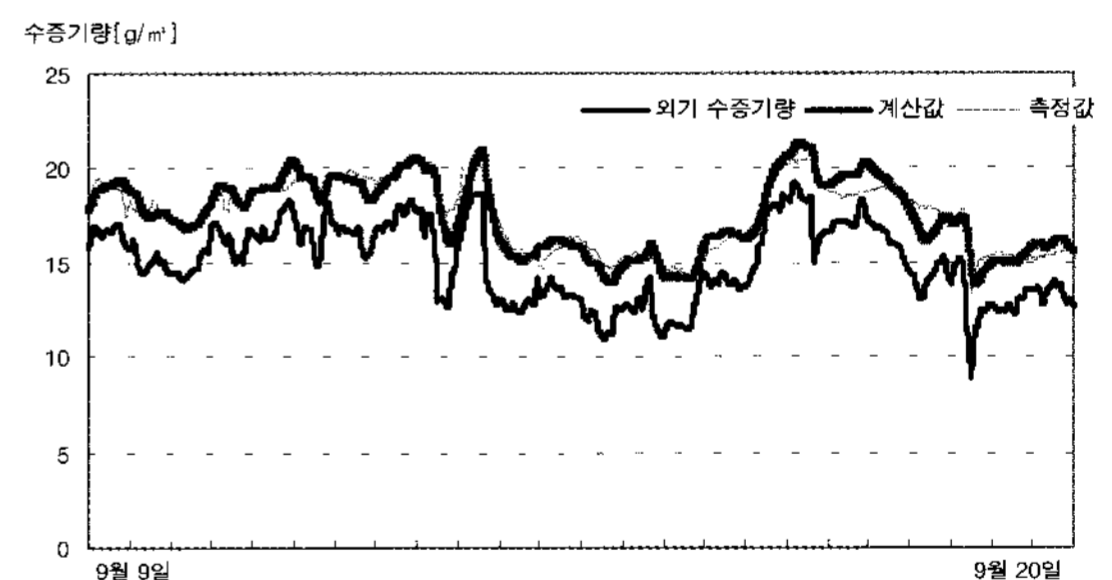


그림 8. 수증기 발생량을 초기 평균 상수값으로 고려한 경우, 실내 수증기량 분포

이 때 실내 수증기 발생량을 평균값은 1.3g/m³ h 이었으며 실험기간 중 계산값과의 오차는 최대 12.4%이고 평균 2.9%으로 하루동안의 실측값을 이용한 연중 실내 수증기 분포에 대한 습기모델의 유효성과 관련하여 비교적 무리가 없는 수치라고 판단된다.

5. 결 론

이상으로 수학적 모델링으로 한계가 있는 실내 수증기 발생량에 대하여 단기간 측정을 활용한 상수화 및 그에 따른 습기 모델의 유효성을 평가 하였다. 중요 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 건물 구조체의 흡·방습에 의한 실내 수증기 발생량을 고려하지 않은 경우, 실내 수증기량, 상대습도는 외기 수증기량, 상대습도와 유사한 거동을 보였다
- 2) 구조체의 흡·방습에 의한 실내 수증기 발생량을 고려하지 않은 경우, 건물에서 실내 수증기량, 상대습도 측정값과 시뮬레이션을 통해 얻은 계산값이 큰 차이를 보였다. 이는 실내 수증기량과 상대습도를 예측하기 위해서는 실내 수증기 발생량이 주요한 인자라고 할 수 있다.
- 3) 실내 수증기 발생량을 실측값과 계산값과의 비교를 통해 수치적으로 확인한 결과 하루 주기의 변화 양상을 보였다.
- 4) 수치모델의 활용을 위해 하루동안의 실측을 통한 수증기 발생량 평균값을 시뮬레이션의 입력 상수값으로 활용한 결과 실측과의 오차는 최대 12.4%, 평균 2.9%으로 나타났다.

본 연구를 통하여 구조체 흡방습과 관련한 기초자료 및 단기 실험 데이터의 활용에 관한 효과적인 방법이 제시되었다고 판단되며 향후 통계적 방법을 포함한 다양한 실험방법을 통해 거주자 활

동을 포함한 수증기 발생량에 관한 연구가 필요하다고 사료된다.

후 기

이 논문은 인하대학교 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Bennett et al., Estimating the contribution of individual work tasks to room concentration : method applied to embalming, American Industrial Hygiene Association Journal, No. 57, pp. 599~609, 1996
2. Xiaoshu Lu, Estimation of indoor moisture generation rate from measurement in buildings, Building and Environment, No. 38, pp. 665~675, 2003
3. J. A. Duffie, W. A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, John Willey & Sons, 1991.
4. Frank P. Incropera, David P. Dewit, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons.
5. Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, Numerical Methods for Engineerings, Mc Graw Hill