

하이브리드 환기 시뮬레이션 모델의 보정: yes or no?

김영진*, 박철수**

*성균관대학교 건축공학과(wape99@skku.edu), **성균관대학교 건축공학과(cheolspark@skku.ac.kr)

Calibration in Hybrid Ventilation Simulation: yes or no?

Kim, Young-Jin*, Park, Cheol-Soo**

*Dept. of Architectural Eng., SungKyungKwan University(wape99@skku.edu),
**Dept. of Architectural Eng., SungKyungKwan University(cheolspark@skku.ac.kr)

Abstract

This study investigates the need of calibrating a nodal network ventilation simulation model (CONTAMW 2.4). For this purpose, the series of ventilation experiments were conducted and then compared to simulation outputs from an uncalibrated simulation model, resulting in a significant difference between two. Hence, an optimization routine was employed to estimate unknown parameters in the simulation model. In the paper, the authors presents 13 unknown parameters with the validated simulation model. It was found that the model with estimated unknown parameters predicts the ventilation phenomena accurately.

Keywords : 환기(Ventilation), 계수추정(Parameter Estimation), 보정(Calibration), 미지변수(Unknown parameters)

기 호 설 명

Y_k	: 관측 벡터
Ψ_k	: 이산상태공간의 상태 벡터
z	: 관측 횟수
ξ	: 미지 변수 벡터
lb	: 미지 변수의 상한 벡터
ub	: 미지 변수의 하한 벡터

1. 서 론

환기는 거주공간의 실내공기질 (IAQ: Indoor Air Quality)을 확보하기 위해 전문적인 시뮬레이션 툴들이 사용되고 있다. 특히, 환기 시스템 중에 하이브리드 방식의 시뮬레이션은 건축주, 설계자, 시공자, 그리고 소비자들에게 유용한 정보를 제공해 주고자 많은 노력을 기울이고 있다.

그러나 환기 시뮬레이션 모델링은 많은 한계와 가정들이 존재하며, 동일한 해석조건이라도 엔지니어의 비판적이고 주관적인 판단

으로 인해 시뮬레이션 예측모델은 상이한 결과들을 보여준다. 따라서, 불확실한 미지변수들에 의한 시뮬레이션 결과값은 상당한 오차가 발생하며, 이런 경우에는 미지변수들 (unknown parameters)에 대한 보정 (calibration)이 필요하다.

본 연구에서는 환기 시뮬레이션 모델의 보정에 대한 필요성을 제시하기 위해 1 세대에 대한 환기실험을 진행하였고, CO₂농도를 측정하였다. 그리고 기존문헌을 통해 CONTAMW 2.4의 미지변수들을 조사하였다. 이를 바탕으로 실험을 통해 측정된 결과값 (CO₂농도-침실1, 거실)과 시뮬레이션 결과값을 최소화시키는 계수추정기법을 이용하여 미지변수들을 30분 간격으로 추정하였다. 그리고 추정된 모델의 정확성을 검증하기 위해, 별도로 수집된 검증용 데이터에 추정된 계수를 적용하여 측정된 결과값과 시뮬레이션 결과값을 정량적으로 비교/분석하였다.

2. 보정(calibration)의 필요성

환기 시뮬레이션은 빌딩의 기류유동 분석, 실내공기질의 예측/평가, 그리고 환기 시스템의 성능예측을 위해 엔지니어들에 의해 다양한 시뮬레이션 툴(CFD, COMIS, 그리고 CONTAM 등)들이 사용되고 있다. 그러나 복잡한 물리적 현상(예를 들면 기류유동에 영향을 주는 풍향, 풍속과 불확실한 재실자의 이동과 발생강도에 따라 달라지는 CO₂농도)을 수학적 방정식에 근거한 시뮬레이션 모델로 정확히 예측하는 것은 어렵다.

만약 시뮬레이션 결과값이 법규적 기준, 또는 환기시스템 설계자, 시공자, 의사결정자의 요구조건과 차이가 발생한다면, 일부 시뮬레이션 수행자들은 시행착오(trial and error)를 통해 그 차이가 최대한 줄어들 때까지 시뮬레이션 결과값에 영향을 주는 미지변수(불확실한 변수로서 ‘정확한 값’이 아니라 ‘범위’가 정해진 변수)들을 변경하게 된다. 이는 변수

의 변경으로 시뮬레이션 결과값은 변동이 가능하며, 결과값은 엔지니어의 주관적인 판단에 의해 상이한 결과값을 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 그리고 이런 수많은 불확실한 변수의 조작은 시뮬레이션 결과의 신뢰를 떨어지게 한다 (Troncoso, 1997).

대부분의 시뮬레이션 모델은 그림 1과 같이 총 3단계를 통해 이루어진다.

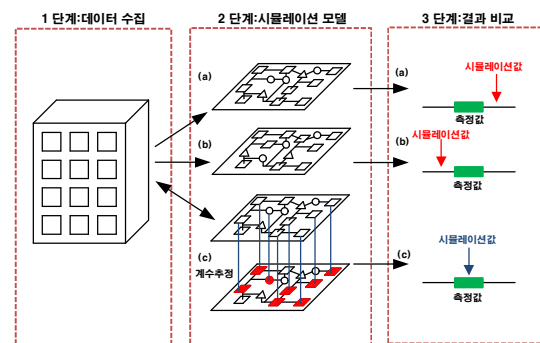


그림 1. 시뮬레이션 보정의 필요성

그러나 그림 1의 (a), (b)와 같이 미지변수들의 보정을 안 할 경우에는 시뮬레이션 수행자에 의한 변수 선정은 어려운 부분이 될 수 있고, 기존 문헌(문헌마다 제시하는 값이 다름) 또는 주관적인 판단으로 변수 값을 선정하였기 때문에 그 결과값은 상이하다.

이와 달리 그림 1의 (c)와 같이 1-2단계 사이에서 수집된 데이터를 이용하여 측정된 결과값과 시뮬레이션 결과값을 최소화시키는 계수추정기법을 수행함으로써, 대상건물의 표준적인 수학적 모델을 만들 수 있다. 이는 미지변수 선정이 용이하고, 측정된 결과값에 유사한 해를 얻을 수 있다.

따라서, 시뮬레이션 모델의 보정은 복잡한 건물에 대한 수학적 모델링을 수행하기 위해서는 필수적인 부분이며, 본 연구에서는 하이브리드 환기 시뮬레이션에 대한 보정의 필요성을 제시하고자 한다.

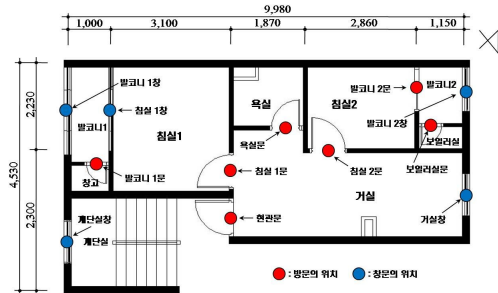
3. 환기 실험

환기 시뮬레이션을 위한 대상건물은 인천시 서구 가정동에 위치한 공동주택(6층)을 본 연구의 실험장소로 선정하였다(그림 2). 실험 세대수는 1세대(2층)로 하였고, 하이브리드 방식을 적용하였다. 이때, 외기공급량 결정기준은 상시환기(CAV-60CMH)로 정하였고, 급기구 설치위치는 침실1+침실2+거실에 설치하였다.

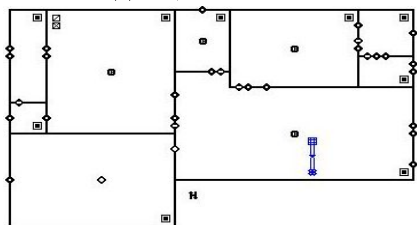
환기실험 대상건물의 기본평면은 그림 3(a)와 같고, 그림 3(b)는 대상건물에 대한 CONTAMW 2.4 모델을 보여준다.



그림 2. 대상건물



(a) 대상세대 평면



(b) CONTMAW 2.4 모델

그림 3. 대상세대 평면 및 CONTMAW 2.4 모델

하이브리드 방식의 실험(2009년 3월 20일, 150분-계수추정, 150분-검증)은 그림 4와 같다. 물론, 개구부(창, 문)를 통한 침기도 동시에 발생한다. 재실자(연구원 성인 4명)는 실간 이동, 실외 출입이 자유롭게 허용되었고, 각 실별 재실유무 및 개구부 개폐비율은 webcam을 사용하여 실시간으로 측정하였다(그림 5).

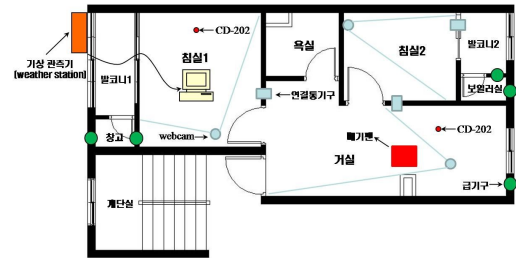


그림 4. 하이브리드 방식 측정



그림 5. 설치된 CO₂ 센서와 웹캠에 의한 기록 화면

그리고, CONTAMW 2.4를 수행하기 위해 필요한 기상데이터(실외온도, 풍향, 풍속)는 HOBO社에서 제공한 기상관측기(H21-001, S-THA-M017, S-WCA-M003)를 통해 1분 간격으로 측정하였다. CO₂농도, 실내온도는 KEMIK社의 CO₂센서(CD-202)를 이용하여, 침실 1과 거실 두 곳에서 1분 간격으로 측정하였다.

4. 계수추정

4.1 미지변수의 선정

환기 시뮬레이션의 미지변수는 기존 문헌을 참고하여 시뮬레이션의 입력변수 [1], [2], 그리고 재실자의 오염물질발생강도 비율로 구분하였다(표 1). 이 미지변수들은 실험을 통해 측정하기 어렵고, 기존 문헌에서도 각

변수마다 최소, 최대값으로 범위만을 지정하고 있기 때문에 시뮬레이션 수행자의 주관적인 판단에 의해 결정된다. 또한 각 미지변수들은 시간과 공간에 따라 유의하게 변한다.

시뮬레이션 입력변수 [1]은 시뮬레이션 수행자들에 의해 주관적으로 적용되는 무차원수들로 기류량의 동적거동을 설명하는 미지변수들이다. 기존 문헌에서는 시뮬레이션 입력변수 [1]에 대해 특정한 실험을 통한 경험적인 계수값(무차원)의 적정범위 (표 1)만을 제시하였지만, 시간에 따라 유의하게 변하는 미지변수들에 대한 정확한 해를 제시하지 못하는 단점이 있다. 따라서, 기류량의 동적거동을 모사하는데 필요한 미지변수들에 대한 계수추정은 환기 시스템의 수학적 모델에 필요한 부분이다.

시뮬레이션 입력변수 [2]는 하이브리드의 운영방식(강제배기, 자연급기)을 설명하기 위해 필요한 변수로서, 덕트와 배기팬의 관계를 표현한다. 이때, 변수들은 배기팬에 의해서 강제배기되는 불확실한 기류의 동적흐름(층류, 난류흐름)에 의해 지배당하는 미지변수들이다. 기존 문헌에서는 시뮬레이션 입력변수 [1]과 마찬가지로 배기팬과 덕트의 형상 및 재질에 따른 미지변수들의 범위 (표 1)만을 제시하였고, 이는 배기팬과 덕트의 관계를 설명하는 동적인 미지변수들에 대한 정확한 해를 제시할 수 없다.

재실자는 한 존안에서도 그 위치가 유동적으로 변하는 변수들로서, 재실자에 의해서 발생하는 오염물질 발생강도와 재실자 위치는 CO₂ 측정값에 영향을 준다. 본 연구에서는 한 사람당 성인 1명이 발생하는 오염물질 강도를 0.31(l/min)로 정하였고, 표 1과 같이 각 존에 대한 재실자의 오염물질 발생강도는 재실자의 대사량에 따라 80-150%까지 변동할 수 있다고 정하였다. 이는 한 존안에서도 재실자의 행동에 따라 유의하게 변하는 미지변수로 이에 대한 계수추정은 필요한 부분이다.

표 1. 미지변수의 선정

		미지변수	최소	최빈	최대	참고문헌
x1	시뮬레이션 입력변수 [1]	Flow exponent	0.60	0.65	0.70	Walton & Dols (2005)
x2		차출계수(Discharge coefficient)	0.60	0.675	0.75	ASHRAE (2001), Moon (2005)
x3		Cp 값	0.00	0.5	1.00	Moon (2005)
x4		Wind velocity profile exponent	0.33	0.33	0.40	Walton & Dols (2005), Moon (2005)
x5		Local terrain constant	0.28	0.28	0.40	Moon (2005)
x6	시뮬레이션 입력변수 [2]	Terminal loss coefficient	0.001	0.001	2.00	ASHRAE (2005), Walton & Dols (2005)
x7		Local loss coefficient (Leakage class #1) (oval)	3.00	3	12.00	
x8		Local loss coefficient (Leakage class #2) (rectangular)	3.00	6	12.00	
x9		Duct roughness	0.03	0.15	3.00	
x10	오염 물질발생 강도 비율(재 실자)	침실1 (%)	0.80	1.0	1.50	ASHRAE (2004)
x11		침실2 (%)	0.80	1.0	1.50	
x12		거실 (%)	0.80	1.0	1.50	
x13		욕실 (%)	0.80	1.0	1.50	

4.2 계수추정 방법

계수추정기법은 실제 측정값과 시뮬레이션 결과값의 차이를 최소화하는 방법으로 미지변수를 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 계수추정기법을 이용하여 표 1에서 제시된 미지변수들을 30분 간격으로 추정하였다. 이때, 30분 간격으로 추정한 이유는 미지변수들의 변동을 충분히 설명할 수 있는 시간간격으로 판단하였기 때문이다.

계수추정은 식 1과 같이 표현되고, 목적함수(S)를 최소화시키기 위해 비선형 최적화 문제에 적합한 MATLAB Optimization toolbox의 'LSQNONLIN' 함수를 사용하였다.

$$\min S = \sum_{k=1}^z [Y_k - \psi_k(\xi_i)]^T [Y_k - \psi_k(\xi_i)] \quad (1)$$

$$s.t. : lb \leq \xi \leq ub$$

4.3 계수추정 결과

계수추정에 의한 보정결과는 표 5와 같으며, 각 미지변수들이 시간에 따라 유의하게 변하는 것을 알 수 있다.

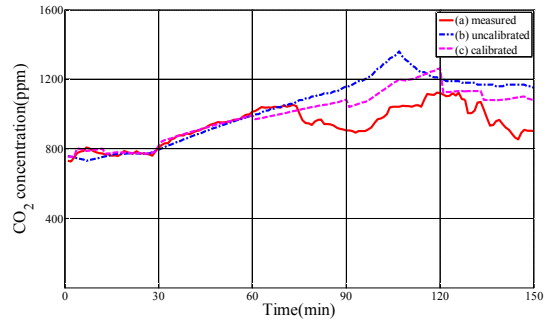
표 2. 계수추정결과

	추정값					평균
	1-30분	31-60분	61-90분	91-120분	121-150분	
x1	0.6847	0.6100	0.6100	0.6101	0.6351	0.6300
x2	0.7431	0.6005	0.7191	0.7499	0.6468	0.6919
x3	0.0683	0.5000	0.5000	0.5000	0.5130	0.4163
x4	0.3762	0.3314	0.3875	0.3431	0.3328	0.3542
x5	0.3653	0.3020	0.2987	0.2815	0.2832	0.3061
x6	1.0258	0.4855	0.0010	0.4851	0.0847	0.4164
x7	3.0208	3.0000	3.0000	3.0000	3.0203	3.0082
x8	6.3146	6.0467	8.8361	4.7045	6.0785	6.3961
x9	0.0369	0.1500	0.1500	0.0561	0.1872	0.1160
x10	0.8363	0.8941	0.8160	0.8590	0.8449	0.8501
x11	0.8726	1.4997	1.5000	1.5000	1.1098	1.2964
x12	1.0479	1.0000	0.9990	1.0000	0.9983	1.0090
x13	1.4545	1.5000	1.4998	1.4999	1.0047	1.3918

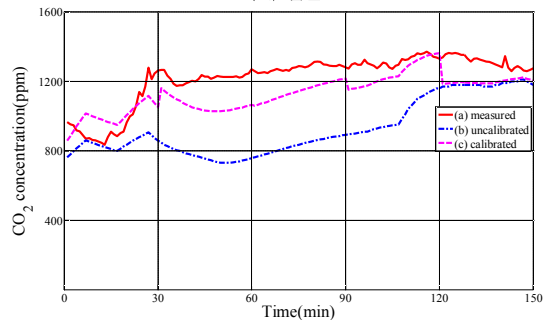
표 3과 그림 6은 하이브리드 방식에 대한 (a) 측정값, (b) 계수추정이 미 적용된 시뮬레이션 결과, (c) 계수추정이 적용된 시뮬레이션 결과를 비교한 결과이다. 이때, (b) 계수추정이 미 적용된 시뮬레이션의 입력변수는 발생할 확률이 가장 높은 최빈값을 적용하였다. 그 결과, 측정값과 계수추정이 미 적용된 시뮬레이션 결과값의 차이(|(a)-(b)|)보다 측정값과 계수추정이 적용된 시뮬레이션 결과값의 차이(|(a)-(c)|)가 줄어들며, 이는 계수추정된 시뮬레이션이 하이브리드의 동적인 특성을 더 정확히 모사 할 수 있음을 알 수 있다.

표 3. 측정값(a), 계수추정이 미 적용된 시뮬레이션 결과값(b), 계수 추정된 시뮬레이션 결과값(c) 간의 CO₂농도 차이

분	침실1(ppm)		거실(ppm)	
	(a)-(b)	(a)-(c)	(a)-(b)	(a)-(c)
1-30	13	8	142	20
31-60	19	0.7	453	159
61-90	89	37	445	135
91-120	242	150	319	68
121-150	184	115	129	114
평균	109	62	297	99



(가) 침실1



(나) 거실

그림 6. 하이브리드 방식 계수추정 비교

5. 계수추정 결과의 검증

계수추정을 통하여 보정된 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위해서 150분 동안 실측(2009년 3월 20일)을 하였고, 별도의 검증용 데이터(침실1, 거실의 CO₂농도)를 1분 간격으로 수집하였다.

그 결과(표 4, 그림 7), 침실1에서는 측정값과 계수추정이 미 적용된 시뮬레이션 결과값의 차이(|(a)-(b)|)보다 측정값과 계수추정이 적용된 시뮬레이션 결과값의 차이(|(a)-(c)|)가 평균 20ppm정도 증가하였다. 그러나 이 정도의 증가는 CO₂ 센서의 精度(resolution, ± 50ppm)를 고려하면, 무시할 수 있는 정도이다. 단, 거실에서는 측정값과 계수추정이 적용된 시뮬레이션 결과값의 차이(|(a)-(c)|)가 측정값과 계수추정이 미 적용된 시뮬레이션 결과값의 차이(|(a)-(b)|)에 비해 평균 163ppm정도 감소하였다.

따라서, 하이브리드 환기 시뮬레이션에 준

재하는 불확실한 미지변수들을 계수추정함으로써, 측정값에 유사한 예측모델을 제시할 수 있음을 알 수 있다.

표 4. 측정값(a), 계수추정이 미 적용된 시뮬레이션 결과값(b), 계수 추정된 시뮬레이션 결과값(c) 간의 CO₂농도 차이

분	침실1(ppm)		거실(ppm)	
	(a)-(b)	(a)-(c)	(a)-(b)	(a)-(c)
1-30	180	210	159	20
31-60	96	108	231	77
61-90	8	31	334	180
91-120	13	30	378	188
121-150	31	49	392	215
평균	66	86	299	136

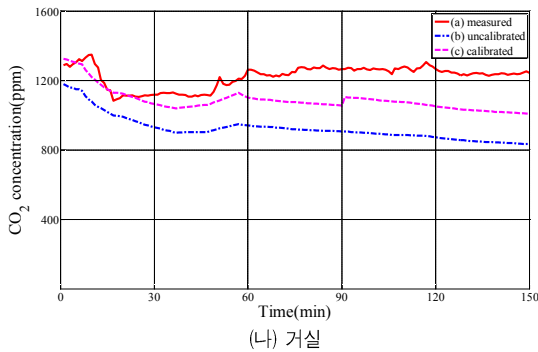
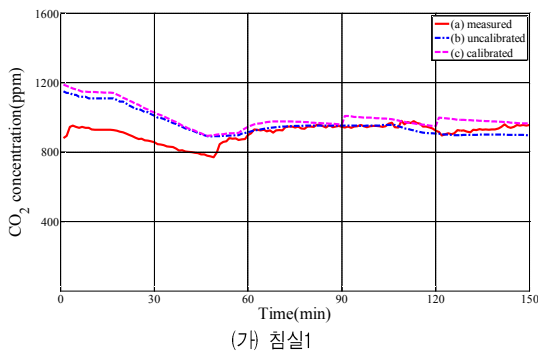


그림 7. 하이브리드 방식 계수추정 비교

6. 결론

환기 시뮬레이션 모델의 보정(calibration)에 대한 필요성을 시뮬레이션 수행자들에게 제시하기 위해, 본 연구에서는 (1) 실험을 통한 데이터 수집, (2) 수학적 모델완성, (3) 계수추정(parameter estimation)의 적용, (4) 검증(validation)을 진행하였다. 계수추정 결과,

대상건물의 동적인 특성을 고려한 표준적인 수학적 모델의 작성이 용이하였으며, 기존의 최빈값을 적용한 시뮬레이션 결과값보다 측정값과의 차이가 감소하였다. 즉, 계수추정은 시뮬레이션의 표준적인 모델을 제시해 주고, 시뮬레이션 수행자들에게 미지변수선정에 따른 어려움을 줄여줄 수 있는 이점이 있다.

후 기

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. (과제 번호 : 05건설핵심D06)

참 고 문 헌

1. ASHRAE (2001), ASHRAE Handbook Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
2. ASHRAE (2005), ASHRAE Handbook Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
3. Moon, H.J. (2005), Assessing mold risks in buildings under uncertainty. Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
4. Troncoso, R (1997). A hybrid monitoring-modeling procedure for analyzing the performance of large central chilling plants. IBPSA Conference Proceedings, Prague, Czech Republic, Sept. 13-15.
5. Walton, G.N. and Dols, W.S. (2005), CONTAMW 2.4 User Guide and Program Documentation. NISTIR 7251, Gaithersburg, MD, National Institute of Standards and Technology.