

## 이중외피 형상에 따른 모델 보정과 local 기상 정보의 필요성

윤경수\*, 김덕우\*\*, 이건호\*\*\*, 박철수\*\*\*\*

\*성균관대학교 대학원(ksyoon77@skku.edu), \*\*성균관대학교 대학원(headwt@hanmail.net),  
\*\*한국건설기술연구원(lee1ncdh@kict.re.kr), \*\*\*성균관대학교 건축공학과(cheolspark@skku.ac.kr)

### Calibration of Double-skin Simulation Model Depending on Configuration And Impact of Local Weather Information

Yoon, Kyung-Soo\*, Kim, Deuk-Woo\*, Lee, Keon-Ho\*\*, Park, Cheol-Soo\*\*\*

\*Dept. of Architectural Engineering, Graduate School, SungKyunKwan University(ksyoon77@skku.edu),  
\*\*Dept. of Architectural Engineering, Graduate School, SungKyunKwan University(headwt@hanmail.net),  
\*\*\*Korea Institute of Construction Technology(lee1ncdh@kict.re.kr)  
\*\*\*\*Dept. of Architectural Engineering, SungKyunKwan University(cheolspark@skku.ac.kr)

#### Abstract

In order to achieve performance assessment and optimal control of a double-skin system, an accurate simulation model is required. In the previous study, a lumped simulation model of such system was developed. As a follow-up of the previous research, the first objective of this paper is to investigate how the mathematical model should be calibrated according to system configuration(cavity width, depth, height, airflow pattern, local environment, etc.). And the second objective of this study is to discuss the effect of local weather information. In conclusion, this paper describes that the model should be recalibrated according to configuration. And it is necessary to have local weather information for accurate prediction and optimal control of the system.

Keywords : 이중외피(Double-skin), 집중모델(Lumped model), 계수추정(Parameter estimation), 미지계수(Unknown parameter), 보정(Calibration), 지역기상정보(Local weather information)

#### 기 호 설 명

$c$  : 유량계수 (무차원)  
 $n$  : 유량지수 (무차원)  
 $A_c$  : 중공층 단면적 ( $m^2$ )

$Y_k$  : 관측벡터  
 $\psi_k$  : 상태벡터  
 $\xi_i$  : 미지계수  
 $lb$  : 미지계수의 상한 벡터  
 $ub$  : 미지계수의 하한 벡터  
 $u_{lsv}$  : 국소 표면 풍속 ( $m/s$ )

접수일자 : 2009년 11월 04일, 심사완료일자:2009년 00월 00일  
교신저자 : 박철수(cheolspark@skku.ac.kr)

$N$	: Nusselt 수 (무차원)
$k_f$	: 유리의 열전도율 ( $W/mK$ )
$D_s$	: 복층유리 중공층 폭( $m$ )
$\Delta T$	: 온도차 ( $K$ )
$u_{ca}$	: 중공층 기류 속도 ( $cm/s$ )
$L$	: 중공층 높이 ( $m$ )
$OR$	: 댐퍼 개폐율

## 1. 서 론

건물의 냉/난방 에너지 절감 및 자연 환기, 실내 쾌적감 등의 실내 환경 향상 등의 장점을 가진 이중외피에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이중외피 시스템의 에너지 성능을 분석하고, 최적 제어를 위해서는 시뮬레이션 모델의 개발이 필수적이다. 이중외피 시스템에 대한 시뮬레이션 모델 개발은 이전 연구에서 수행되었다(윤성환 2008). 개발된 이중외피 모델은 시스템을 1차원 모델로 단순화하고, 수학적 모델링 과정에서 수반되는 미지계수(unknown parameter)를 계수 추정(parameter estimation) 방법을 이용하여 계산하였다. 그리고 보정된 모델(calibrated model)을 이용하여 계산된 결과와 다른 기후에서의 실제 측정값과의 비교를 통해 모델의 정확성을 검증하였다.

본 연구의 첫 번째 목적은 기존에 개발된 이중외피 시스템의 시뮬레이션 모델을 수정 없이 다른 형상의 이중외피 시스템에 적용하였을 경우, 시스템의 반응(system's behavior)을 정확하게 예측할 수 있는지를 알아보는 것이다. 이를 위해서 기존의 이중외피 시스템(그림 1, 시스템 A)과 형상(유리창 크기, 중공층 깊이, 루버 색상, 창호 개폐 방식 등)이 변경된 이중외피 시스템(그림 2, 시스템 B)을 선정하여 기존의 시뮬레이션 모델의 적용 가능성과 형상에 따른 모델의 보정 필요성에 대해 알아보려고 한다.

본 연구의 두 번째 목적은 시뮬레이션 시 광범위한 지역을 대표하는 기상청 기상 정보(global information)를 사용하는 것과 이와 비교하여, 시스템이 위치한 곳에서 직접 측정한

지역 기상 정보(local information)를 사용하는 것이 시스템의 반응을 예측하고, 최적제어에 적용 가능한지를 확인하는 것이다. 특히, 풍향, 풍속 등의 global 기상 정보는 실제 시스템이 있는 곳의 local 기상 정보와 차이가 있을 것으로 예상된다. 환언하면, 시스템의 최적제어를 위해 광역 기상 정보를 인터넷으로 전송받아 사용해야 하는지, 또는 local weather station을 설치하고 실시간으로 정보를 모니터링 해야 하는지를 확인하고자 한다.

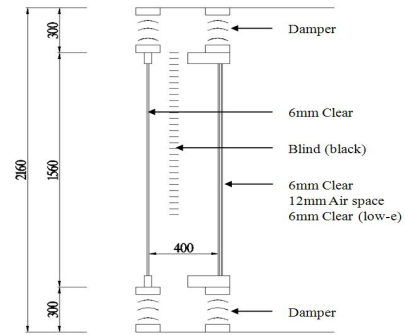


그림 1. 시스템A (S대학에 설치된 이중외피 시스템)

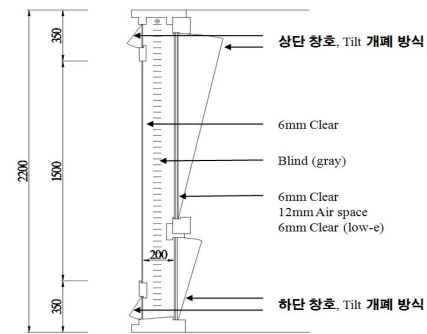


그림 2. 시스템B (OO연구원에 설치된 이중외피 시스템)

## 2. 이중외피 시뮬레이션 모델 및 보정

이중외피 시스템 내에서 일어나는 열전달 및 기류 유동 현상을 집중 모델(lumped model)로 표현하는 수학적 모델은 불규칙한 3차원 형상의 시스템에서의 물리적 현상을 단순화하

기 위해 수직 방향으로 온도 구배가 없는 1차원 모델로 가정하였다(그림 3). 이는 과도 열전달 프로세스 중의 임의의 순간에 고체, 유체의 온도가 공간적으로 균일하다는 가정에 기반을 둔다(Incropera, 2008).

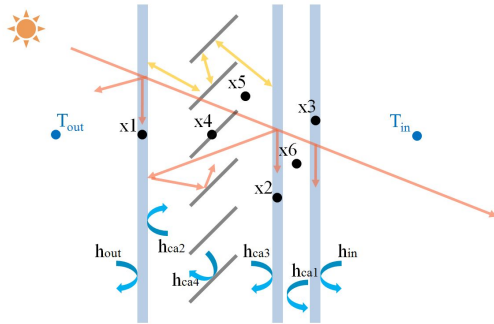


그림 3. 이중외피 시스템(3D→1D) (시스템 A, B)  
 (x1 = 실외 유리 온도 x2 = 실내 복층유리 외측 온도 x3 = 실내 복층유리 내측 온도, x4 = 블라인드 슬릿 온도 x5 = 중공층 공기 온도, x6 = 복층유리 중공층 공기 온도)

이와 같은 이중외피 시스템의 수학적 모델은 기류 모델 (airflow model)과 열적 모델 (thermal model)로 구분할 수 있다.

기류 모델은 10가지 기류 모드에 따라 이중외피 중공층에서 발생하는 기류 유동에 대한 것이다(그림 4).

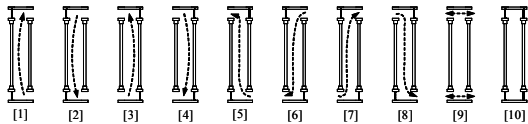


그림 4. 이중외피 중공층 내 기류모드

실내 기류모드([1] [2]), 실외 기류모드([3] [4]) 등에 대한 자세한 설명은 기존 문헌(윤성환 2008)에 상술되어 있고, 연구에 사용된 실험 데이터가 대각 기류 모드인 경우에만 해당되기 때문에 본 논문에서는 대각 기류모드([5]-[8])와 관련된 내용만 기술한다.

대각 기류 모드(diagonal airflow)에서 기류량( $Q_{ca}$ )과 중공층 기류 속도( $u_{ca}$ )는 실내외 압력차( $\Delta P$ )를 이용하여 각각 식(1), (2)과 같이

계산된다.

$$Q_{ca} = c(\Delta P)^n \quad (1)$$

$$u_{ca} = \frac{Q_{ca}}{A_c} = \frac{c}{A_c}(\Delta P)^n \quad (2)$$

열적 모델은 이중외피에서 흡수, 반사, 투과되는 태양 일사, 이중외피 중공층 표면간의 장파 복사, 유리창 및 블라인드 표면에서 발생하는 대류 열전달 현상에 대한 것이다(Rheault and Bilgen, 1989; Incropera, 2008).

전술한 두 가지 모델은 다음의 미지계수를 포함하고 있다. 미지계수란 해석적으로 계산할 수 없고, 문헌에서도 구할 수 없는 계수를 의미한다.

- 식 (1),(2)의 유량계수 (flow coefficient) 와 유량지수 (flow exponent)
- 대류열전달계수

따라서 위의 미지계수들은 수학적 모델의 시뮬레이션 값과 실제 측정값 사이의 차이를 최소화 하는 계수추정 방법을 이용하여 추정된다. 계수추정 방법은 식 (3)의 목적함수(S)를 최소화하는 형식으로 표현된다.

$$\min S = \sum_{k=1}^z [Y_k - \psi_k(\xi_i)]^T [Y_k - \psi_k(\xi_i)] \quad (3)$$

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

선정된 미지계수는 식 (3) 내부에서 다음과 같이 표현된다.

- 유량계수(c), 유량지수(n) :

대각 기류 모드에서의 유량계수(c)와 유량지수(n)는 각각 식(4), (5)로 수식화 되었다.

$$c = \xi_1 (OR)^{\xi_2} \quad (4)$$

$$Q_{ca} = c(\Delta P)^n = c(\Delta P)^{\xi_3} \quad (5)$$

- 대류열전달계수 :

$$h_{out} = 5.678 \left[ \xi_4 + \xi_5 \left( \frac{u_{lsv}}{0.3048} \right)^{\xi_6} \right] \quad (6)$$

$$h_{ca,1} = \frac{Nk_f}{D_s} + \xi_7 \quad (7)$$

$$h_{ca,2} = \xi_8 + \xi_9 (\Delta T)^{\xi_{10}} + [\xi_{19} (u_{ca})^{\xi_{20}}]^+ \quad (8)$$

$$h_{ca,3} = \xi_{11} + \xi_{12} (\Delta T)^{\xi_{13}} + [\xi_{19} (u_{ca})^{\xi_{20}}]^+ \quad (9)$$

$$h_{ca,4} = \xi_{14} + \xi_{15} (\Delta T)^{\xi_{16}} + [\xi_{19} (u_{ca})^{\xi_{20}}]^+ \quad (10)$$

$$h_{in} = \xi_{17} \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{\xi_{18}} \quad (11)$$

식 (5)의 최적화 문제를 해결하기 위해, MATLAB Optimization toolbox의 'lsqnonlin' 함수를 사용하였다. 'lsqnonlin' 함수에 의해, 식 (3)의 해를 구하였다.

### 3. 모델 적용 및 결과

2절의 내용을 바탕으로 기존에 개발된 이중외피(시스템 A) 시뮬레이션 모델을 시스템의 형상이 바뀐 이중외피 시스템(시스템 B)에 그대로 적용할 수 있는지 확인하였다. 즉, 시스템 A의 시뮬레이션 모델에 추정된 미지계수 값을 시스템 B의 모델에 적용하여 계산된 예측값(simulated)과 실제 시스템에서 측정한 실측값(measured)과 비교하였다.

표 1은 시스템 A, B의 구성요소를 비교한 것이다.

표 1. 이중외피 시스템(시스템 A, B)의 구성요소

구 분	시스템 A(그림 1)	시스템 B(그림 2)
유리창 높이	1.56 m	2.20 m
유리창 길이	2.05 m	4.50 m
유리창 종류	그림1 참조	그림2 참조
중공층 깊이	400 mm	200 mm
블라인드 색	black	gray
개폐 방식	전동 damper	Tilt 방식

표 2, 3은 시스템 A의 시뮬레이션 모델을 시스템 B에 적용한 결과이다. 이전 연구에서 같은 모델을 시스템 A에 적용한 결과, 중공층 기류속도( $u_{ca}$ )와 상태변수( $x_1-x_5$ )에 대한 모델의 예측값과 측정값의 차이는 각각 10.23 cm/s, 0.92°C였다.

표 2. 모델 적용 결과 (중공층 기류 속도) (cm/s)

구 분	시스템 B의 결과
$u_{ca, simulated}$	51.71
$u_{ca, measured}$	16.56
$\Delta u_{ca}$	<b>35.48</b>

표 3. 모델 적용 결과 (상태변수) (°C)

$ X_{measured} - X_{simulated} $	시스템 B의 결과
$x_1$	2.61
$x_2$	3.77
$x_3$	1.01
$x_4$	5.16
$x_5$	6.08
평 균	<b>3.73</b>

기존에 개발된 모델을 형상이 변경된 이중외피 시스템(시스템 B)에 적용하여 중공층의 기류 속도를 계산한 결과, 35.48cm/s이다. 그리고 상태변수(그림 3) 예측값과 측정값의 차이를 계산한 결과, 3.73°C이다. 시스템 A에 비해 시스템 B에 적용한 모델의 예측값과 실측값 사이의 차이가 크다.

위의 결과는 다른 형상의 시스템에 이전 시뮬레이션 모델을 수정 없이 적용하였을 때, 모델이 시스템의 반응을 정확하게 예측하지 못할 수도 있음을 의미한다. 즉, 같은 이중외피라고 할지라도 시스템의 블라인드 크기, 중공층의 폭, 깊이, 기류 패턴, 공기 출입구(inlet, outlet) 형상, 시스템의 지역적 환경(local environment)<sup>1)</sup> 등이 변경되면, 시뮬레이션 모델이 변경된 시스템에 맞게 보정(calibration) 되어야 함을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 시스템 B의 수학적 모델링 과정에서 알 수 없는 계수(유량계수( $c$ ), 유량지수( $n$ ), 대류 열전달 계수( $h$ ))를 미지계수로 두고, 다음절에서 계수추정 방법을 이용하여 모델을 보정하였다.

### 4. 시뮬레이션 모델의 보정 (시스템 B)

시스템 B에서 선정된 미지계수는 시스템 A

1) 시스템 A는 건물 1층에 위치 (경기도 수원), 시스템 B는 4층 건물 옥상에 위치 (경기도 일산)

에서 선정된 것과 동일하다. 계수추정은 표 4와 같이 2단계로 진행이 되는데, 1단계는 대각 기류 모드(외측창 하단/내측창 상단 개방, [6][7])에 해당되는 것으로 유량계수( $c$ )와 유량지수( $n$ )를 추정하며, 2단계는 열적 모드에 해당되는 것으로 대류열전달계수( $h$ )를 추정한다.

표 4. 시스템 B의 계수 추정 단계

	추정할 미지계수	비 고
1단계	$c, n$	기류모델
2단계	$h_{out}, h_{ca1}, h_{ca2}, h_{ca3}, h_{ca4}, h_{in}$	열적모델

• 1단계 : 기류 모델 계수추정

기류 모델의 계수추정을 위해 약 72시간(2008년 12월 21일-24일) 동안 실험이 진행되었다. 실험 기간의 실내 온도는 20°C로 유지하였고, 중공층 내부의 블라인드 슬릿 각도는 90°(수직, 완전히 닫힌 상태)로 유지하였다. 위의 기상 데이터를 이용하여 식 (4), (5)의 미지계수( $c, n$ )를 추정하고, 이를 다른 기상 데이터(2008년 12월 29일-30일)에 적용하여 검증한 결과는 표 5와 같다.

표 5. Calibrated 모델(기류 모델)의 검증 결과( $cm/s$ )

구 분		시스템 A	시스템 B
$u_{ca}$ ( $cm/s$ )	$u_{ca, simulated}$	23.37	19.83
	$u_{ca, measured}$	20.13	14.37
	$\Delta u_{ca}$	10.23	<b>6.82</b>

보정된 모델(calibrated model)로 시스템 B 중공층의 기류 속도를 계산한 결과, 19.83 $cm/s$ 이다. 센서(Testo社, Testo 400)를 통해 직접 측정된 실측값과 차이는 6.82 $cm/s$ 로 센서의 정도(精度)가  $\pm 3cm/s$ 임을 고려할 때, 기류 모델의 정확성은 높은 것으로 나타났다.

• 2단계 : 열적 모델 계수추정

열적 모델의 계수추정을 위해 사용된 데이터는 1단계에서 사용된 것과 동일하다. 단, 기상 데이터는 기상청<sup>2)</sup>에서 측정된 ○○연구원 일대(문산 지역)의 global 기상 정보(일

사량, 풍향, 풍속 등)를 사용하였는데, 이는 ○○연구원에는 측정 장비가 없어서 local 기상 정보를 측정하지 못 했기 때문이다. 하지만 이러한 상황에서, global 기상 정보가 local 기상 정보를 대신할 수 있는지를 알아보는 것도 연구의 한 부분이기 때문에 아래의 global 기상 정보를 그대로 사용하였다.

- 직달 일사량( $I_D$ ) 및 확산 일사량( $I_d$ )
- 외부 풍향( $WD$ ) 및 풍속( $WS$ )

일사량의 경우, 기상청에서 얻은 전일사량( $I_{total}$ )을 가지고 문헌의 알고리즘을 적용하여 직달 일사량( $I_D$ )과 확산 일사량( $I_d$ )을 계산하였고, 이를 모델에 적용하였다(SERI, 1987; Duffie 2006; ASHRAE, 2005). 외부 풍향 및 풍속의 경우, 기상청 데이터(문산 지역)를 그대로 모델에 적용하였다.

실험기간 중 이중외피의 창문 개방시간에 따라, 시간을 구분하여 미지계수( $h$ )를 추정하였다(09:00-18:00 개방). 미지계수로 선정된 대류 열전달계수를 추정된 결과는 표 6과 같다.

표 6. 2단계 대류열전달계수 추정 결과( $W/m^2K$ )

미지계수		시스템 A	시스템 B
식(6)	$h_{out}$	11.64	7.52
식(7)	$h_{ca1}$	3.95	4.56
식(8)	$h_{ca2}$	2.60	3.19 / 1.32
식(9)	$h_{ca3}$	3.37	3.28 / 1.37
식(10)	$h_{ca4}$	3.63	5.17 / 0.92
식(11)	$h_{in}$	3.29	4.91

주간(중공층 열림) / 야간(중공층 닫힘)

표 7은 보정된 모델을 다른 기상 데이터(2008년 12월 29일-30일)에 적용하여 검증한 결과를 보여준다.

표 7. Calibrated 모델(열적 모델) 검증 결과(°C)

$ X_{measured} - X_{simulated} $	시스템 B 결과
$x_1$	3.29
$x_2$	4.45
$x_3$	0.93
$x_4$	5.41
$x_5$	6.95
평 균	<b>4.21</b>

2) 기상청 전자민원센터 (<http://minwon.kma.go.kr/index.jsp>)

검증 결과를 보면 열적 모델의 예측값과 실측값 사이의 차이가 크다. 이는 시물레이션 모델에 global 기상 데이터가 적용되었기 때문이다. 유리창을 통해 획득되는 에너지량 계산 시에는 일사량(직달( $I_d$ ), 확산( $I_d$ ), 반사( $I_{gr}$ ))이 많은 영향을 미친다. 그리고 중공층 내부의 기류 유동을 고려할 때에도 외부의 풍향(WD)과 풍속(WS)이 많은 영향을 미친다. 따라서 이것은 시물레이션 모델에 global 기상 정보를 적용하게 되면 시스템 반응을 예측하는데 정확성이 떨어질 수 있음을 의미한다. 아울러, 실시간 최적제어 구현에는 local 기상 정보가 필요함을 알 수 있다.

## 6. 결론

다른 형상의 시스템(시스템 B)에 이전 연구에서 개발된 시물레이션 모델(시스템 A)을 그대로 적용할 수 있는지를 확인하는 과정에서 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다.

- 같은 형태(실외측 단층유리, 실내측 복층유리, 중공층 내 블라인드가 설치된 이중외피)의 시스템이라고 할지라도, 시스템의 형상(유리창 크기, 중공층 깊이, 블라인드 색상, 창문 개폐 방식 등)이 변경되면 형상에 따라 시물레이션 모델도 보정(calibration)이 되어야 한다.
- 이중외피 시스템의 보정, 성능분석 및 최적제어 시에는 기상청 기상 정보(global information)보다 실제 시스템이 위치한 곳에서 직접 측정된 기상 정보(local information)가 시물레이션 결과에 더 지배적임을 알 수 있다. 즉, 건물 전체 시물레이션이 아닌 이중외피 시스템 자체의 시스템 반응을 예측할 때는 local 기상 정보를 사용하는 것이 더 정확한 결과를 나타낼 수 있다. 이러한 local 기상 정보는 건물 외피와 인접한 외부에서 측정할 수 있다. 하지만 고

층 건물인 경우, 기상 정보를 측정하는 센서의 위치, 측정 센서의 개수 등에 대한 연구는 추후 연구 과제로 남아 있다.

## 후 기

본 연구는 초고층 복합 빌딩 연구 개발사업 (VC-10) 연구비지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. 윤성환, 박철수 (2008), Grey-box 방법을 이용한 이중외피 집중 시물레이션 모델 개발, 대한건축학회논문집 24권 4호, pp.199-208
2. ASHRAE (2005), ASHRAE handbook fundamentals. ASHRAE. Atlanta. USA
3. Duffie J.A. and Beckman W.A. (2006), Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, 3rd Ed.
4. Incropera F.P. and DeWitt D.P.(2008), Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, 6th Ed.
5. Maxwell E.L. (1987), A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Horizontal to Direct Normal Insolation. Report SERI/TR-215-3087, Solar Energy Research Institute, Golden (CO)
6. Park, C.S., Augenbroe, G., Messadi, T. and Thitisawat, M. (2004), Calibration of a lumped simulation model for double-skin facade systems. Energy and Buildings. Vol.36. pp.1117-1130
7. Rheault, S. and Bilgen, E. (1989), Heat Transfer Analysis in an Automated Venetian Blind Window System. Journal of Solar Energy Engineering. Vol.111. No.1. pp.89-95