

외부바람과 연돌효과의 상호작용에 의한 고층주거 건물의 연간 침기량 분포

박주현* · 윤성민** · 송두삼*** · 김용식****

The annual infiltration distribution caused by wind and stack effects in high-rise residential buildings

Park Ju-Hyun* · Yoon sung-min** · Song Du-Sam*** · Kim Yong-Sik****

Abstract: Infiltration affects indoor environmental and air quality and energy consumptions in buildings. Especially, airflow and the infiltration are more remarkable in high-rise buildings due to the air-driving forces (stack and wind effects). Thus, it is important to understand infiltration distributions in high-rise residential buildings. In this study, the weather-driven infiltration is characterized from the viewpoint of interactions between external wind and stack effect in high-rise residential buildings. To calculate accurately the annual infiltration distributions, this study also suggests an airflow and thermal simulation method with a two-step calibration of air-leakage data. The simulated results show (1) how the interaction between stack and wind effects induce infiltration types (outdoor and interzone air infiltration) and (2) how much the interzone air infiltration (being ignored in previous studies) occurs due to the stack effect, as well as the outdoor air infiltration rates.

키워드: 침기, 고층 주거 건물, 연돌효과, 동적 공기유동 시뮬레이션

Key Words: Infiltration, High-rise residential building, Stack effect, Airflow and thermal simulation

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건물침기는 실내 공기질과 건물 에너지 성능에 큰 영향을 미친다. 특히, 고층 건물에서는 외부바람과 연돌효과에 의해 두드러지는 공기유동 특성에 따라 침기의 영향력이 더욱 크게 나타난다. 한편, 제로에너지건물의 구현을 위해 외피의 단열성능이 지속적으로 향상되는 상황에서, 건물 부하에 대한 침기부하의 비중이 상대적으로 증가하고 있다. 고층 주거건물에서의 침기는 외부바람과 연돌효과의 상호작용에 따른 건물 전체의 압력분포에 의해 결정된다. 예를 들어, 연돌효과가 지배적인 겨울철 저층부의 침기는 외부바람과 연돌효과에 의해 외부에서 유입되는 반면, 고층부의 침기는 바람에 의한 외부로부터의 침기와 연돌효과의 수직적 공기 유동으로 인한 건물 내부(복도)로부터의 침기로 나누어 진다 (Fig. 1 참조). 외부침기와 내부침기는 각각 공기

상태(온습도, 이산화탄소, 농도 등)가 다르기 때문에 이 둘을 구별하여 침기를 해석하는 것이 건물의 실내 공기환경과 냉난방 부하 관점에서 바람직하다. 따라서, 본 연구에서는 침기를 외부바람에 의한 건물 외부로부터의 침기와 연돌효과에 의한 건물 내부로부터의 침기로 구분하여 외부바람과 연돌효과의 상호작용에 의한 각각의 침기량을 공기유동 시뮬레이션을 통해 정량적으로 검토하고자 한다.

1.2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 고층 주거건물의 외부바람과 연돌효과에 의한 층별 침기량 분포를 월별로 분석하였다. 대상건물은 충남 아산시에 위치한 지상 32층, 지하 2층 규모의 탑상형 아파트 한 개동을 대상으로 하였다.

본 연구에서는 대상건물의 실제 침기특성을 정확하게 규명하기 위해 공기유동 시뮬레이션

* 인천대학교 도시과학대학 도시건축학부 연구생

** 인천대학교 도시과학대학 도시건축학부 조교수, 교신저자(syoon@inu.ac.kr)

*** 성균관대학교 건설환경공학부 교수

**** 인천대학교 도시과학대학 도시건축학부 교수

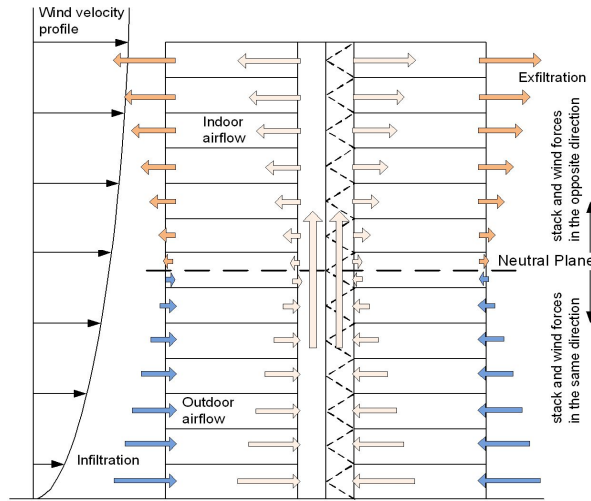


Figure 1. Airflow in high-rise buildings caused by stack effect and wind pressure in winter(S. Yoon et al., 2015)

보정방법을 포함한 분석방법을 제시하여 외부 바람과 연돌효과의 상호작용을 고려한 층별/월별 침기량을 계산하였다.

Table 1. Target building and measurement information(S. Yoon et al., 2015)

Building information	Location	Asan, Korea
	Building type	Multi-residential buildings
	The number of floor	32 floors above ground and 2 floors underground
	Building height	106.9 m2
	Floor area of a household	95.74 m2 - 182.78 m2
	Main horizontal airflow paths	Standard floors: household envelopes, household entrance doors, elevator doors Basement and lobby floors: main entrance door, vestibule doors, elevator doors
	Main vertical airflow paths	E/L shaft, staircase
Measurement condition	Building services system	individual household ventilation systems
	Indoor and outdoor temperatures	Outdoor temperature: -1.37 °C Indoor temperature: 12.3-24 °C
	Wind velocity and direction	0.1 m/s (WSW) or less
	Other conditions	Early morning in winter with little wind (February) Occupied status All airflow paths are closed. Elevator cars and ventilation devices are stopped.

2. 분석방법

고층 주거건물의 복잡한 공기유동 특성을 실제와 유사하게 예측하기 위하여 건물 전체 공기유동 시뮬레이션 방법(Multizone Airflow Network Simulation)을 이용하였다. 이때, 주요 공기유동 경로들의 누기면적 입력값을 타당하게 정의하는 것이 건물 전체의 침기특성을 정확하게 규명하는데 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 공기유동 모델 보정방법을 통해 누기면적을 먼저 타당하게 정의하고, 이를 바탕으로 열공기 연성 모델을 통해 외부바람과 연돌효과의 상호작용을 고려하여 연간 침기량 분포를 계산하였다. 제안한 분석방법은 Fig. 2와 같이 크게 4단계로 구성되어있다: (1) 현장 실측, (2) TDC 개념을 통한 누기면적 예측, (3) 예측된 누기면적의 최적화, (4) 연간 공기유동 분석. 각각의 단계에 대한 설명과 대상건물의 적용은 다음 절에서 이어진다.

2.1 실측(Step 1)

시뮬레이션의 입력변수와 누기면적의 보정을 위한 데이터를 얻기 위하여 현장 측정을 실시하였다. 모델 보정 결과의 정확성을 높이기 위해서는 현상이 명확하고, 실측자로부터 계획된 조건에서 측정된 Intrusive Data가 필요하기 때문에 외부바람보다 불확실성이 적은 연돌효과가 지배적인 상황에서 실측을 진행하는 것을 원칙으로 하였다. 실측항목은 외기온도, 풍속 및 풍향, 실내의 온도분포, 압력차를 도출하기 위한 절대압력 및 차압 그리고 세대 외피 및 환관문의 누기면적을 측정하였다. (S. Yoon et al., 2015)

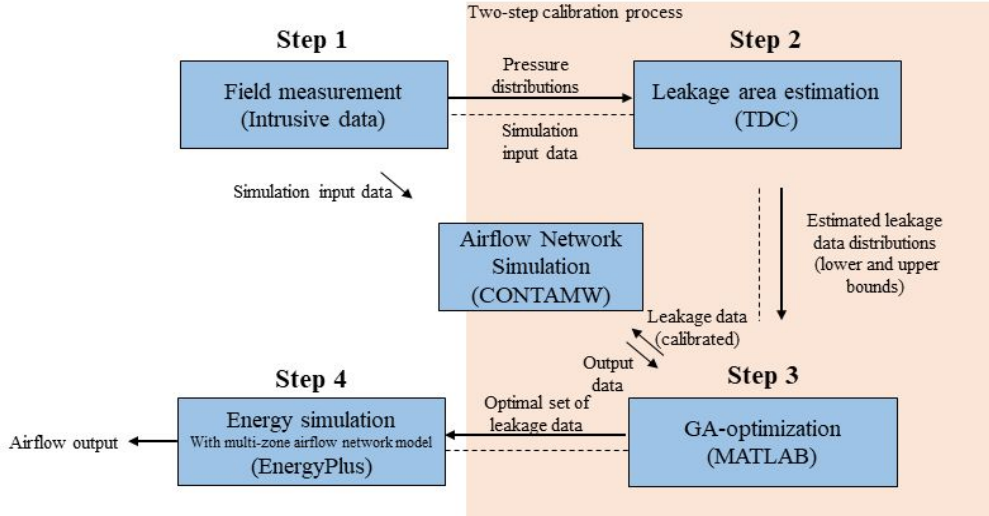


Figure 2. The suggested airflow and energy simulation method in this study

2.2 TDC 개념을 통한 누기면적 예측(Step 2)

고층 빌딩에서의 연돌효과로 인한 압력 분포는 기존 연구 (S. Yoon et al., 2015, S. Hayakawa et al., 1988, ASHRAE, 1997, J.H. Jo et al., 2007, G.T. Tamura et al., 1976)로부터 정의되고 확장된 TDC(Thermal Draft Coefficient)에 의해 분석된다. Hayakawa와 Togari(S. Hayakawa and S. Togari, 1988)에 의해 최초의 TDC(ASHRAE, 1997)개념이 ‘외벽에 작용하는 압력분담률’이라는 의미로 재정의 되었다(식(1)). J.H. Jo et al.(J.H. Jo et al., 2007)은 내부구획에서의 압력차를 확인하기 위해 압력의 내부분담률(Internal Thermal Draft Coefficient, ITDC)을 제안하여 다음 식(2)로 나타냈다. Yoon et al.(S.Yoon et al., 2015)는 공기유동 모델링 관점에서 미지의 누기면적을 예측하기 위하여 TDC 개념을 새롭게 제안하였다. 식(3)과 같이 TDC의 범위를 외벽에서 i층의 j번째 수평경로($\gamma_{i,j}$)로 확대하고, 각 층의 공기유동에 대한 질량보존법칙을 기반으로 i층의 모든 수평 구획에 대한 등가 누기면적을 기준 누기면적($A_{i,Ref}$)과 식(4)의 $\gamma_{i,Ref}$ 로 공식화 했다. 따라서 기준 누기면적과 각층에서의 압력차 분포를 알면 $\gamma_{i,j}$ 을 계산할 수 있고, 식(5)에 의해 각각의 미지의 누기면적을 예측할 수 있다. 이를 적용하여 실측한 압력 분포와 실측한 현관문, 세대 외피의 누기면적을 기반으로 엘리베이터의 누기면적을 기준층에서 계산하였고, 이의 최대/최소값을 이용하여 로비/지하층의 출입문과 방풍문의 누기면적을 예측하였다. TDC를 통해 예측된 누기면적값의 범위를 Table 2에 나타냈다.

$$\gamma_i = \frac{\Delta P_{wi}}{\Delta P_{wi} + \Delta P_{si}} \quad (1)$$

$$\gamma_i = \frac{\Delta P_{wi}}{\Delta P_{wi} + \sum_{j=1}^m \Delta P_{pj} + \Delta P_{si}} \quad (2)$$

$$\gamma_{i,j} = \frac{\Delta P_{i,j}}{\sum_{j=1}^m \Delta P_{i,j}} \quad (3)$$

$$A_{i,e} = A_{i,Ref} \sqrt{\gamma_{i,Ref}} \quad (4)$$

$$A_{i,j} = \frac{A_{i,e}}{\sqrt{\gamma_{i,j}}} \quad (5)$$

- γ_i : TDC at the exterior wall on the *i*th floor
- ΔP_{wi} : Pressure difference at the exterior wall on the *i*th floor (Pa)
- ΔP_{si} : Pressure difference at the shaft wall on the *i*th floor (Pa)
- ΔP_{pj} : Pressure difference at the *j*th partition (Pa)
- γ_{ij} : TDC at the *j*th partition on the *i*th floor
- ΔP_{ij} : Pressure difference at the *j*th partition on the *i*th floor (Pa)
- m* : Number of partitions on the *i*th floor
- $A_{i,e}$: Equivalent leakage area in all horizontal partitions on the *i*th floor
- $A_{i,j}$: Equivalent leakage area in the *j*th partition on the *i*th floor
- $A_{i,Ref}$: Reference leakage area on the *i*th floor
- $\gamma_{i,Ref}$: TDC at the reference partition on the *i*th floor

2.3 누기면적 예측의 최적화(Step 3)

TDC 기반 누기면적은 압력 센서 정확도 및 실측 조건에서의 다양한 불확실성으로 인해 오차가 발생할 수 있다. 아울러, TDC에서 계산할 수 없는 불확실한 공기유동 경로가 존재하기 때문에 누기면적값의 정확도를 더욱 향상시키기 위하여 최적화 기법을 사용한다. 본 단계에서는 이전 단계에서 예측된 누기면적의 범위 내에서 또는 기준문헌값의 범위 내에서 최적의 누기면적을 결정한다. 최적화의 목적 함수는 실측값과 시뮬레이션값(압력차) 간의 차이를 최소화하기 위하여 식(6)과 같이 정의된다.

$$RSS = \sum_{k=1}^n (Y_{m,k} - Y_{s,k}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{i-1}, x_i))^2 \quad (6)$$

$$lb \leq x_i \leq ub$$

- Y_m : Measured pressure difference (Pa)
- Y_s : Pressure difference calculated by CONTAMW (Pa)
- k : Counter for partitions
- n : Number of partitions that are compared using measured and simulated values

- x : Design variable (uncertain leakage area)
- i : Number of design variables
- lb : Lower bound of the design variable
- ub : Upper bound of the design variable

본 연구에서는 목적함수의 설계변수를 Table 2와 같이 11개의 주요 공기유동 경로의 누기면적들로 정의하였다. 주요 경로에 대한 범위는 TDC 예측값을 통해 정의하였고, 나머지 변수의 범위는 문헌조사를 기준으로 입력하였다. 목적함수(식(6))의 최적화(비선형 최소화승 최소화 문제)는 MATLAB의 GA(Genetic Algorithm) (D.E. Goldberg, 1989)를 통해 진행하였고, GA와 CONTAMW(W.S. Dols et al., 2002)를 연성을 통해 GA에 의해 선정된 설계변수가 CONTAMW 모델의 입력변수로 입력되는 반복적인 과정이 가능하게 하여 최적화 문제를 해결하였다. Table 2는 두 가지 보정 단계(Step 2, Step 3)를 기반으로 보정된 누기면적값(최적값)을 나타낸다.

Table 2. Calibrated leakage areas in the target buildings

Floor	Building component	GA-based optimization results*1		
		Design variables	Lower and upper bounds*2	Optimal value
B2	Main entrance door (Swing)	x1	1895.22~7420.26	6769.95
	Vestibule door (Swing)	x2	631.74~2473.42	2105.05
B1	Main entrance door (Swing)	x3	941.16~3684.86	3205.60
	Vestibule door (Swing)	x4	665.50~2605.59	2215.08
1st Floor	Main entrance door (Automatic Door)	x5	1077.71~4219.48	3685.32
	Vestibule door (Swing)	x6	1866.64~7308.35	6445.97
All floors	Household envelope	-	-	2.05 [cm ² /m ² @10Pa]*3
	Household entrance door	-	-	17
	Vestibule door	x7	64.31~352.09 (G.T.Tamura, 1976)	163.50
	Stairwell door	x8	64.31~352.09 (G.T.Tamura, 1976)	219.45
	Elevator door	x9	225.71~1001.14	999.51
33rd Floor	Rooftop entrance door	x10	64.31~352.09 (G.T.Tamura, 1976)	215.53
34th Floor	Top opening of the elevator shaft	x11	0.4~1.0 (ASHRAE, 1997)	0.83 [m ²]

*1: Unit of leakage area: cm²/item@10 Pa, discharge coefficient: 0.611, and flow exponent: 0.65.

*2: The bounds were defined by the TDC estimations or literature review

*3: Leakage area per unit envelope area

2.4 대상건물의 공기유동 분석(Step 4)

본 단계에서는 이전 단계에서 보정된 누기면적을 바탕으로 대상 건물의 열공기 연성 시뮬레이션을 수행한다. 이를 위해 EnergyPlus(DOE, 2013)의 ‘Airflow Network Object(DOE, 2014)’를 이용하여 전층의 공기유동경로에 대한 노드를 수평 및 수직으로 연결하였으며, 각 경로에 해당하는 누기면적을 Table 2의 최적화된 누기면적값으로 설정하였다. 대상건물의 풍압계수는 Akins et al.이 제시한 Surface average calculation(R.E. Akins, 1979) 방법을 이용하여 계산하였다. 시뮬레이션 조건은 Table 3과 같다.

Table 3. Simulation condition

Whether data and site information	Location: Asan, Korea (North Axis: 315, Terrain: Suburbs, Latitude: 36.49, Longitude:127.11, Time Zone: 9, and Elevation: 6)
Thermal performance of envelope	U-value of exterior wall: 0.48 W/m ² ·K U-value of exterior window: 2.924 W/m ² ·K, SHGC: 0.726 U-value of ceiling: 0.519 W/m ² ·K U-value of roof: 0.309 W/m ² ·K U-value of basement floor: 0.519 W/m ² ·K
Leakage areas	As shown in Table 2
Heating systems	Ideal Load Air system Heating set point: 24°C for households
Ventilation system	Not operated
Occupancy schedule	DOE residential-building reference model(DOE,2009)
Internal heat gain	People: 97.2 W/person (Number of persons per housing unit: 4 persons) Lights: 5.8 W/m ² , Electric equipment: 10 W/m ²
Simulation period	1/01~12/31
Airflow network objects	Simulation control: Multizone without distribution Wind pressure coefficient: Surface average calculation Airflow element: Effective leakage area

3. 시뮬레이션 결과

Fig. 3은 대상건물의 월별/층별 침기량 분포를 나타낸다. 침기량 값은 각 층 전체세대의 평균값이다. 더욱이, 외부에서 유입되는 침기(Outdoor Air)와 복도를 경유하여 세대현관문으로 유입되는 침기(Interzone Air)로 구별하여 제시하였다. 두 가지 유형의 침기는 월별 실내외 환경조건에 따라 그리고 층에 따라 다르게 나타났다. 겨울철(Fig. 3 (a), (b), (l)) 외부바람에 의해 발생하는 Outdoor Air는 풍속 프로파일과는 반대로 높이에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이는 겨울철 연돌효과의 압력분포가 외부풍압을 상쇄 시킴에 따라 발생한 것으로 사료되며, 실제로 연돌효과에 의한 Interzone Air의 값이 외부바람에

의한 Outdoor Air보다 우세하게 나타났다(Interzone Air: 80.3%, Outdoor Air: 19.6%). 침기 횟수는 최상층에서 0.1회(Interzone Air: 0.09회, Outdoor Air: 0.01회), 중성대(5,6층)에서 약 0.03회(Interzone Air: 0.015회, Outdoor Air: 0.014회), 1층에서 약 0.023회(Interzone Air: 0.0001회, Outdoor Air: 0.0230회)로 나타났다.

여름철(Fig. 3 (f), (g), (h)) Outdoor Air는 높이에 따라 증가하는 경향을 보이는데, 이는 여름철 역연돌효과의 압력 방향이 외부 바람과 서로 같기 때문이다. 침기횟수는 최상층에서 0.04회(Interzone Air: 0.01회, Outdoor Air: 0.03회), 중성대(5,6층)에서 0.014회(Interzone Air: 0.0008회, Outdoor Air: 0.0132회), 1층에서 약 0.01회(Interzone Air: 0.0035회, Outdoor Air: 0.0055회)로 겨울철 보다 적게 나타났다. 흥미롭게도, 역연돌효과가 지배적인 여름철에도 Interzone Air가 높이에 따라 증가하는 경향이 보였는데 이는 여름철 새벽의 연돌효과로 인하여 나타난 것으로 사료된다.

봄철(Fig. 3 (c), (d), (e))과 가을철(Fig. 3 (i), (j), (k))에는 바람과 연돌효과의 상호작용으로 인하여 Outdoor Air는 높이에 따라 일정하게, Indoor Air는 높이에 따라 증가하는 경향을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 고층 주거건물의 공기유동 특성을 실제와 유사하게 예측할 수 있는 실측기반의 시뮬레이션 방법을 제안하였으며, 침기를 외부에서 유입되는 침기(Outdoor Air)와 내부에서 유입되는 침기(Interzone Air)로 구분하여 대상건물의 침기량 특성을 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다:

- (1) 겨울철 대상건물에서는 대부분의 세대에서 외부바람에 의한 Outdoor Air 침기(19.6%)보다 연돌효과에 의해 복도를 경유하여 세대현관문으로 유입되는 Interzone Air 침기(80.3%)가 매우 크게 나타났다.
- (2) 여름철 대상건물에서는 대부분의 세대에서 Outdoor Air 침기(78.6%)가 Interzone Air 침기(21.4%)보다 크게 나타났으며, 외부바람과 역연돌효과의 압력 방향이 같아 Outdoor Air 침기가 높이에 따라 증가하였다. 또한, 여름철 새벽의 연돌효과로 인하여 Interzone Air도 높이에 따라 증가하는 경향이 나타났다.
- (3) 이러한 결과를 살펴볼 때, 고층 주거건물에서 실내 냉난방 부하와 실내외 공기 환경 분석시 외부바람과 연돌효과의 상호작용으로 인한 다양한 침기특성이 층별/계절별로 고려되어야 한다.

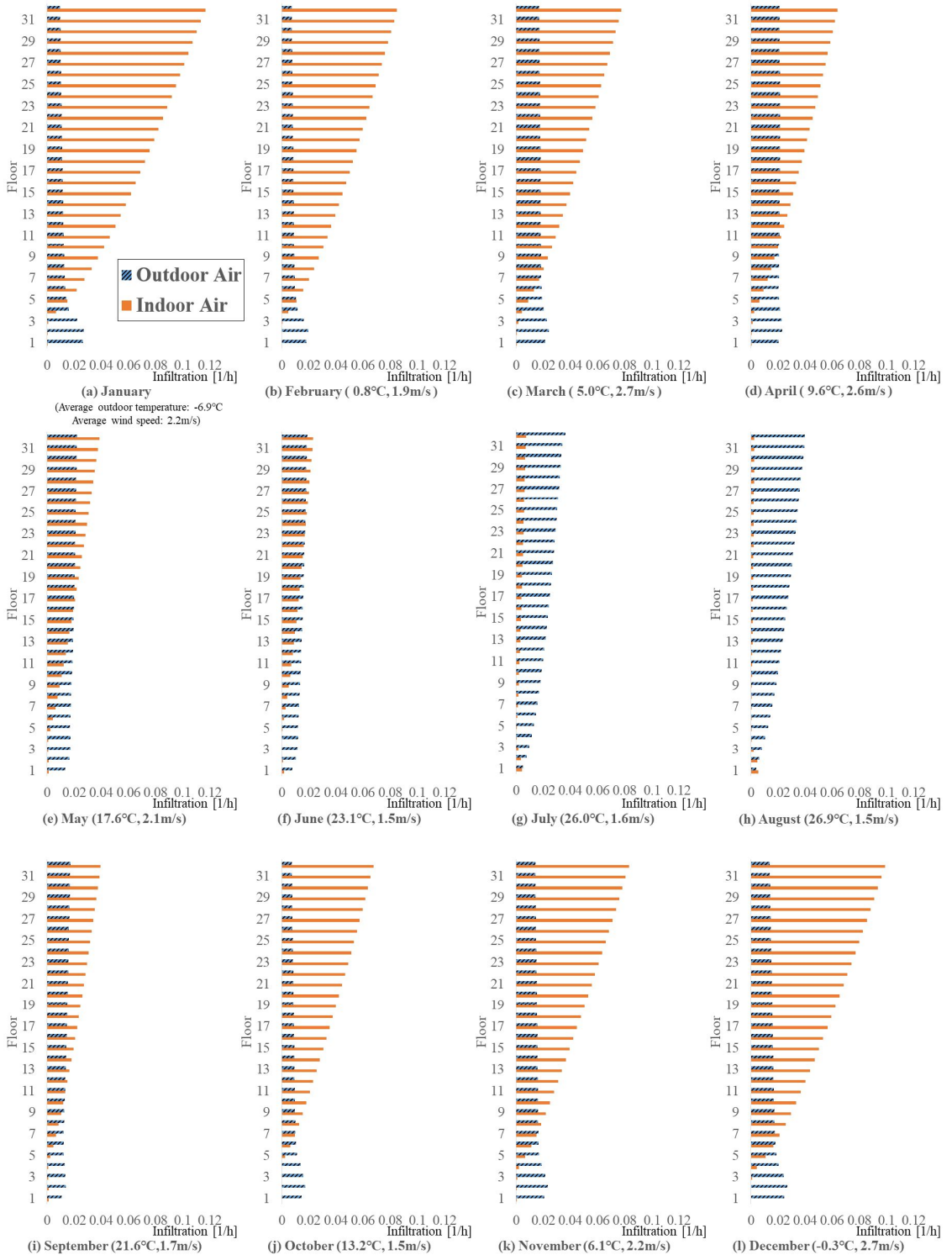


Figure 3. The annual distribution of infiltration

REFERENCES

- S. Yoon, J. Seo, W. Cho, D. Song, A calibration method for whole-building airflow simulation in high-rise residential buildings, *Building and Environment* 85, 253-262, 2015.
- S. Hayakawa, S. Togari, Study on the stack effect of tall office building. *J Archit Inst Jpn* ; 387(1):42e52, 1988.
- ASHRAE. 1997 ASHRAE Handbook—Fundamentals, Chapter 25: Ventilation and Infiltration. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 1997.
- J.H. Jo, J.H. Lim, S.Y. Song, M.S. Yeo, K.W. Kim, Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings, *Building and Environment* 42, 263-277, 2007
- G.T. Tamura, C.Y. Shaw, Studies on exterior wall air tightness and air infiltration of tall buildings. *ASHRAE Transactions* 82 (1), 122-134, 1976
- D.E. Goldberg, Genetic algorithm in search optimization and machine learning. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.; 1989.
- W.S. Dols, G.N. Walton, K.R. Denton, CONTAMW 2.0 User Manual-NISTIR 6921, National Institute of Standards and Technology; 2002.
- G.T. Tamura, C.Y. Shaw. Air leakage data for the design of elevator and stair shaft pressurization systems. *ASHRAE Transactions*; 82(2):179-90, 1976.
- DOE, EnergyPlus 8.1, U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2013.
- DOE, EnergyPlus Engineering references-EergyPlus Manual Documentation, The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory; 2014.
- R.E. Akins, J.A. Peterka, and J.E. Cermak. 1979. Averaged pressure coefficients for rectangular buildings, vol. 1, Proceedings of the Fifth International Wind Engineering Conference, Fort Collins, pp. 369-380.
- DOE, DOE Residential-Building Reference Model, U.S. Department of Energy, Washington DC, USA; 2009.

논문투고일 2019년 5월 30일

논문심사일 2019년 6월 10일

논문게제일 2019년 6월 30일