

건축물 구획실간 틈새에서의 누설유동에 대한 수치모델 연구

Study on Numerical Model of Leakage Flow at Gap between Compartments in a Building

김정엽(Jung-Yup Kim)^{1*}, 김지석(Ji-Seok Kim)¹

¹한국건설기술연구원 화재안전연구센터

¹Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology, Koyang 411-712, Republic of Korea

(Received July 3, 2013; revision received September 17, 2013)

Abstract 1D-numerical analysis of the network algorithm with the orifice equation for the relationship between pressure difference and flowrate has been mostly used to analyse leakage flow at the gap. In this study, a 3D-numerical method applying momentum loss model to the gap region in the computational domain is represented to reflect effectively the effect of leakage flow by determining the proportion of pressure difference to air passage velocity. While the 3D-numerical method is verified through the computation of the two compartments model, the numerical analysis of the stack effect in a building stairway is performed. As the temperature of air outside drops, the pressure in the upper stairway and leakage flowrate through the gap in the door rise. The change of gap area does not have an effect on pressure in the stairway for the analysis conditions.

Key words Gap(틈새), Leakage flow(누설유동), Pressure difference(압력차), Momentum loss model(운동량 손실 모델), Numerical analysis(수치해석)

* Corresponding author, E-mail: jykim1@kict.re.kr

1. 서 론

1.1 누설유동을 포함하는 건축물 열유동 현상

건축물에는 출입문이나 창호의 틈새와 같이 구획실간 틈새가 존재하며, 이러한 틈새를 통해서 유동이 발생하게 된다. 이러한 유동은 건축물에서 일어나는 다양한 열유동 현상에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 해석방안이 필요하다. 건축물에서의 연돌현상, 환기설계, 기밀도와 에너지 해석 및 화재시 연기제어 등은 이러한 틈새유동이 중요한 인자로 고려되고 있다.

건축물에서의 틈새유동과 연돌현상에 대한 연구로서는 실제 고층 건축물을 대상으로 구획실간 틈새특성을 포함하여 연돌효과에 영향을 주는 건축적 인자들을 선정하고 공기유동해석 시뮬레이션을 통하여 연돌효과의 영향을 평가하였으며⁽¹⁾, 고층 건축물에 대해서 현장실측과 이론식을 통해 하절기와 동절기의 틈새 누설유동을 계산하고 동절기의 연돌효과를 분석하였는데 이러한 과정에서 정밀한 틈새유동의 예측기법에 대한 개발의 필요성을 제기하였다.⁽²⁾

화재시 연기제어 분야에서 구획실간 틈새의 영향에 대한 연구로서는 피난계단에 대한 급기가압 제연설비의 설계시 피난문 누설틈새의 오류로 인하여 설계내용이 현실과 동떨어진 잘못된 결과로 이어질 수 있음을 주지하고 누설틈새를 주요 변수로 하는 연기유동 해석을 통해 새로운 누설틈새 모델을 제시하였다.⁽³⁾ 또한 20층 규모의 건축물을 대상으로 화재안전기준의 피난문 틈새면적과 설계기법을 적용하고 네트워크 수치해석 알고리즘을 사용하여 급기가압 제연시스템에 의해 형성되는 건축물 내 압력장을 분석하였다.⁽⁴⁾

환기설계 분야에서는 환기설계시 건축물의 틈새와 기밀도를 포함하는 인자가 건축물의 환기량에 미치는 영향에 대해서 네트워크 수치해석 알고리즘을 사용하여 분석하였으며,⁽⁵⁾ 건축물의 기밀성능 측정법을 바탕으로 실제 공동주택에서의 기밀성능을 측정하였으며 기밀화에 따른 에너지 절감효과를 검토하였다.⁽⁶⁾

1.2 누설유동의 기존 해석방법 검토

앞에서의 기존 연구에서는 건축물내에서 틈새의 누

설유동을 포함하는 해석을 위해서 주로 식(1)과 같이 틈새 전후의 압력차와 누설유량의 관계식을 이용하고 있다.

$$Q = f(\Delta p) \quad (1)$$

여기서 Q 는 누설유량, Δp 는 틈새 전후의 압력차를 각각 나타낸다.

압력차와 누설유량의 관계식에 대해서는 70~90년대에 이론식과 실험자료 도출을 중심으로 연구가 많이 수행되었다. 구획실의 틈새 누설유동에 대한 실험데이터와 차원해석을 통해서 압력차, 유량, 레이놀즈수 등의 관련 인자간 관계식 및 계수를 도출하였으며⁽⁷⁾, 이러한 연구와 이론적 분석을 바탕으로 압력차와 유량사이의 2차원 방정식을 제시하고 계수 산정을 위한 실험을 수행하였다.⁽⁸⁾

한편 다양한 구조의 출입문 틈새에서의 누설유동을 예측할 수 있는 Gap Method를 제시하였으며, 출입문 전후의 3가지 압력차 범위에 따라서 무차원 유량과 무차원 차압간 관계를 설정하는 방정식을 도출하고 실험데이터와 비교하였다.⁽⁹⁾

또한 건축물내 출입문의 틈새유동에서는 식(2)와 같이 간단한 Orifice Equation과 Gap Method 사이에 계산결과의 차이가 거의 발생하지 않는 것으로 나타난다.⁽¹⁰⁾

$$Q = CA\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = C_i\sqrt{\Delta p} \quad (2)$$

여기서 Q 는 누설유량, Δp 는 틈새 전후의 압력차, C 는 유동계수, A 는 틈새면적, ρ 는 공기의 밀도를 각각 나타낸다.

상기에서 살펴본 바와 같이 건축물에서의 틈새 누설유동과 관련된 연구에서는 주로 식(2)의 압력차-누설유량 관계식과 건축물내 각 구획실을 한 개의 질점으로 상정하는 네트워크 수치해석 알고리즘을 이용하여 1차원적으로 건축물내 압력과 유동장을 해석하고 있다.

1.3 3차원 수치해석의 누설유동 수치모델 검토

한편 전산유체역학을 바탕으로 3차원 열유동 해석 기법이 크게 발전하고 있으며, 건축물의 다양한 분야에 적용되고 있다. 그런데 틈새의 누설유동을 포함하는 경우에는 건축물의 타 공간에 비해 틈새의 단면적이 매우 적기 때문에 틈새를 포함하는 격자생성과 3차원 유동해석에 많은 어려움이 발생하고 있다. 따라서 틈새를 포함하는 3차원 해석을 위한 방안이 필요하다고 판단된다.

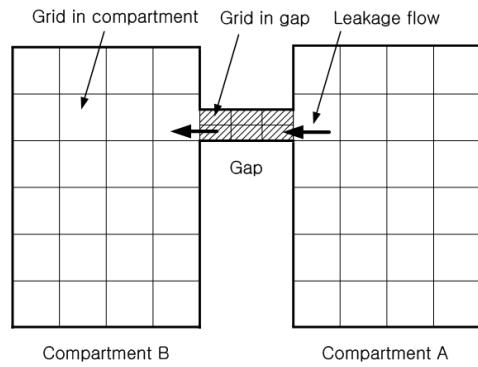


Fig. 1 Schematic diagram of gap between compartments.

앞에서와 같이 출입문의 틈새를 통한 누설유량은 출입문 전후의 압력차와 틈새유량의 관계식으로 설정할 수 있으며, 전산유체역학에서는 운동량방정식에서 이러한 관계를 생성항에서의 Momentum Loss Model로 반영할 수 있다.⁽¹¹⁾

즉 Fig. 1과 같이 해석모델의 격자에서 틈새부분의 영역에 대해서 식(3)과 같이 압력저하가 통과유속에 비례하도록 하는 Momentum Loss Model을 적용하면 틈새유동의 효과를 반영할 수 있다.

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = K_{loss} \frac{\rho}{2} |u|u_i \quad (3)$$

여기서 K_{loss} 는 2차 저항계수이다.

K_{loss} 는 출입문 틈새의 특성을 나타내는 계수로서 실험 데이터를 포함하는 식(2)의 Orifice Equation과 식(3)의 Momentum Loss Model부터 계산할 수 있다.

본 연구에서는 건축물의 틈새유동 해석에 많이 적용되고 있는 Orifice Equation과 Momentum Loss Model을 사용하여 건축물내 구획실간 틈새에서의 누설유동을 포함하는 3차원 열유동 해석방안을 제시하였다. 또한 이러한 해석방안을 이용해서 출입문 틈새를 포함하는 건축물 계단에서의 연돌효과에 대한 3차원 수치해석을 수행하였다.

2. 출입문을 포함하는 구획실간 해석

본 연구에서는 우선 구획실 2개소를 연결하는 출입문의 틈새 누설유동에 대해서 3차원 수치해석을 수행하고 특성을 분석하였다. 적용한 출입문의 압력차와 누설유량의 관계식, 유동계수 및 기하학적 변수는 연기설계 분야 대표서적⁽¹⁰⁾의 자료를 활용하였다. 즉 Table 1과 같이 출입문의 높이는 2.1 m, 폭은 0.9 m이며, 상단과 측면의 틈새 두께는 0.508 mm, 하단의 틈새 두께

는 6.35 mm이다. 압력차와 누설유량의 관계는 식(2)의 Orifice Equation에 의해 정해지며, 유동계수 C 는 0.65 이고 공기온도는 20°C이다. 이러한 출입문의 특성에 대해서 구획실간 압력차와 이에 대응하는 틈새 누설유동의 유량을 주요구간에 대해 구하면 Table 2와 같다.

Fig. 2는 구획실 2개소 및 출입문을 포함하는 해석 모델을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 공기 유입구가 있는 구획실 A와 공기 유출구가 있는 구획실 B 사이에 닫혀 있는 출입문이 존재한다. 공기는 구획실 A의 유입구로 들어온 후 출입문 틈새를 거쳐서 구획실 B로 들어가며 구획실 B의 유출구를 통해 외부로 나간다.

수치해석에서는 구획실 A의 유입구에 대한 경계조건으로 Table 2의 누설유량값을 입력값으로 설정하여 계산을 수행하며, 구획실 A와 구획실 B 사이에 형성되는 압력차를 검토하였다. 즉 Table 2의 오른쪽 열의 누설유량값을 구획실 A의 유입구 경계조건으로 설정하여 구획실 유동을 계산하고, 계산에 의해서 구획실간 형성되는 압력차와 Table 2의 왼쪽 열의 압력차를 비교하는 방향으로 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 수치해석 프로그램으로서 정확성과 타당성이 검증되어 열·유동해석문제에 널리 적용되고 있는 CFX14⁽¹¹⁾를 사용하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 수치해석에서는 출입문 틈새유동을 Momentum Loss Model로 처리하였으며, 식(3)에서 2차 저항계수 K_{loss} 는 식(2)의 Orifice Equation을 참조하면 다음의 식(4)와 같이 도출할 수 있다.

$$K_{loss} = \frac{2}{\rho} \frac{A_m^2}{\Delta L C_t^2} \quad (4)$$

여기서 A_m 은 수치해석 모델에서의 출입문 틈새의 면적, ΔL 은 출입문 두께, C_t 은 Orifice Equation에서의 계수를 각각 나타낸다.

Fig. 3과 Fig. 4는 유입구에서의 유량이 0.049615682 m³/s로서 환기횟수로는 9.04회/h인 경우에 대한 수치해석 결과를 보여주고 있다. Fig. 3은 유입구에서 들어오는 공기의 유선분포를 보여주고 있다. 그림에서와 같

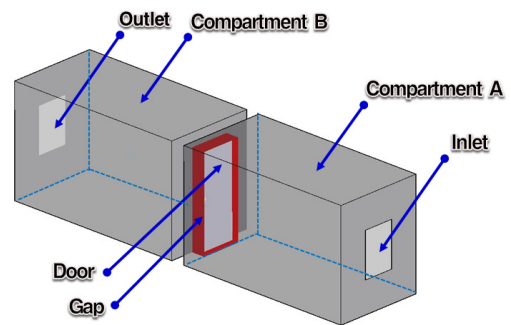


Fig. 2 Numerical model of leakage flow at gap between compartments.

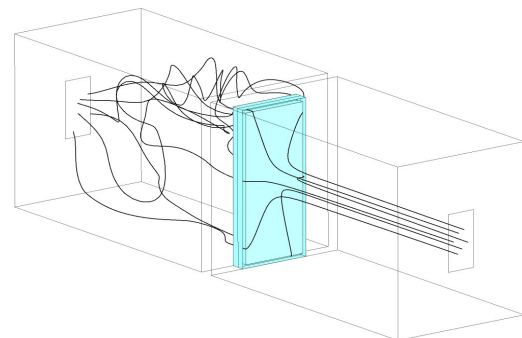


Fig. 3 Streamlines in compartments.

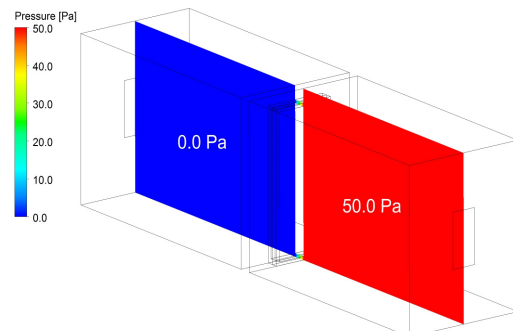


Fig. 4 Pressure contours on center plane of compartments.

Table 1 Geometry of door

Factor		Value
Door	Width	0.9 m
	Height	2.1 m
Gap thickness	Top and sides	0.508 mm
	Bottom	6.35 mm
Door thickness(ΔL)		0.2 m
Flow Coefficient(C)		0.65

Table 2 Flow rate induced by pressure difference through gap of door

Pressure difference (Pa)	Flow rate (m ³ /s)
10	0.022188807
20	0.031379712
30	0.038432142
40	0.044377615
50	0.049615682
60	0.054351256

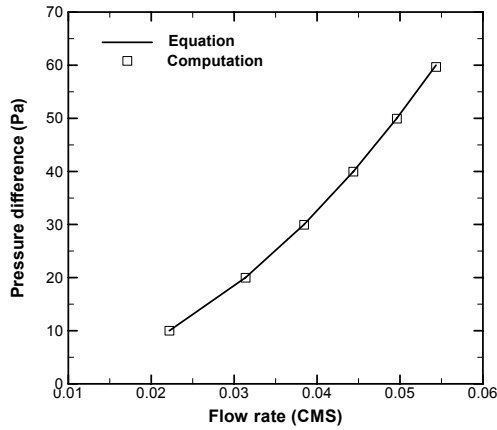


Fig. 5 Pressure difference between compartments for leakage flow rate through gap of door.

이 구획실 A의 유입구에서 들어오는 공기가 출입문의 틈새를 통과하여 구획실 B로 흐르고 구획실 B의 유출구를 통해 외부로 나간다. Fig. 4는 중앙 단면에서의 압력분포를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 구획실 A는 50 Pa 정도로 압력이 형성되고 구획실 B는 0 Pa 정도로 형성되어서 구획실간 압력차가 50 Pa 정도가 됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 Orifice Equation과 수치해석에 의해 얻어지는 압력차와 누설유량의 관계를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 고려한 유량값에 대해서 Orifice Equation과 수치해석의 결과값이 거의 일치하고 있으며, 이로부터 Momentum Loss Model을 적용한 3차원 수치해석 모델이 틈새의 누설유동을 적절히 구현할 수 있다고 판단된다.

3. 계단에서의 연돌효과 해석

본 연구에서는 앞에서 검토한 틈새 누설유동의 Momentum Loss Model을 이용해서 건축물 계단에서의 연돌효과에 대한 3차원 수치해석을 수행하였다.

Fig. 6은 해석대상인 건축물 계단의 수치모델을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 계단의 층수는 총 11층이고 각 층의 높이는 3 m이다. 1층과 11층에 계단과 연결되는 구획실 및 출입문을 설치하였으며, 외부와 접하는 구획실의 한 면 전체를 개구부로 처리하였다. 출입문의 틈새 누설유동은 Momentum Loss Model을 적용하였다. 해석에서는 계단과 구획실의 온도를 20℃로 설정하였고 외기온도는 -20~10℃의 범위로 하였다.

Fig. 7은 계단에서의 연돌효과에 대한 해석결과로서 계단 중앙단면에서의 압력분포를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 외기온도가 -10℃인 조건에서의 해석결과로서 계단 1층에서는 약 -18 Pa 정도의 부압이 형성되고 계단

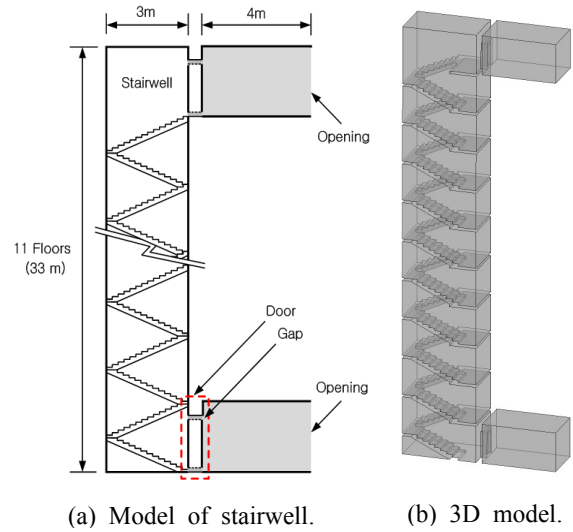


Fig. 6 Numerical model of stairwell for analysis of stack effect.

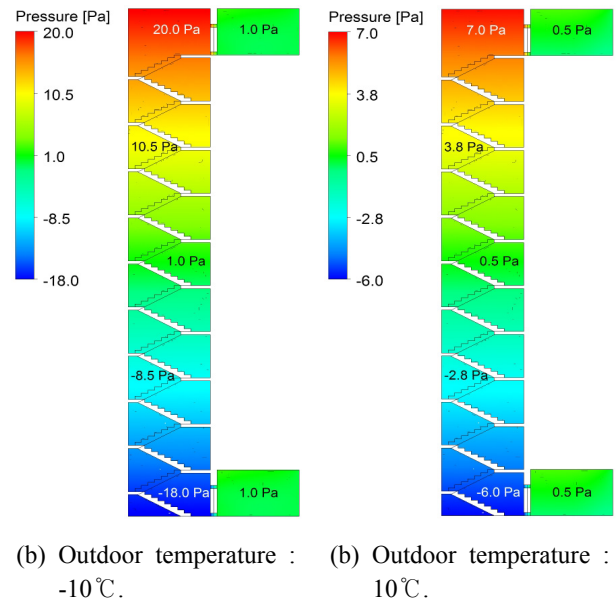


Fig. 7 Pressure contours on center plane of stairwell.

11층에서는 약 20 Pa 정도의 양압이 형성된다. 한편 Fig. 7(b)는 외기온도가 10℃인 조건에서의 해석결과로서 계단 1층에서는 약 -6 Pa 정도의 부압이 형성되고 계단 11층에서는 약 7 Pa 정도의 양압이 형성된다.

Fig. 8은 외기온도에 따른 계단 11층에서의 압력형성 및 출입문 틈새유동의 유량을 나타내었다. 그림에서와 같이 외기온도가 낮아질수록 계단 11층에서 형성되는 압력이 높아지며, 출입문 틈새를 통과하는 누설 유량도 증가한다.

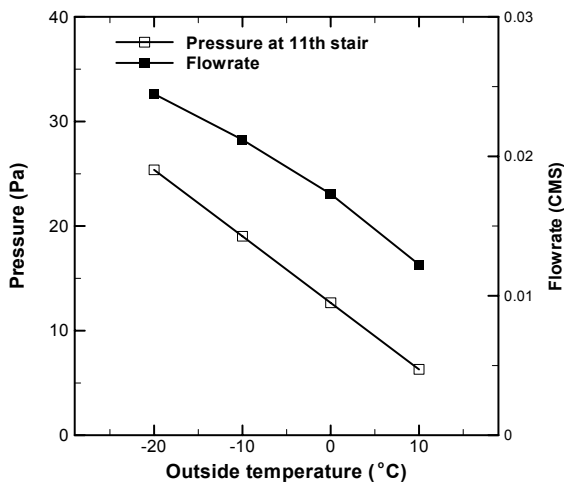


Fig. 8 Pressure at 11th stair and leakage flowrate for outside temperature.

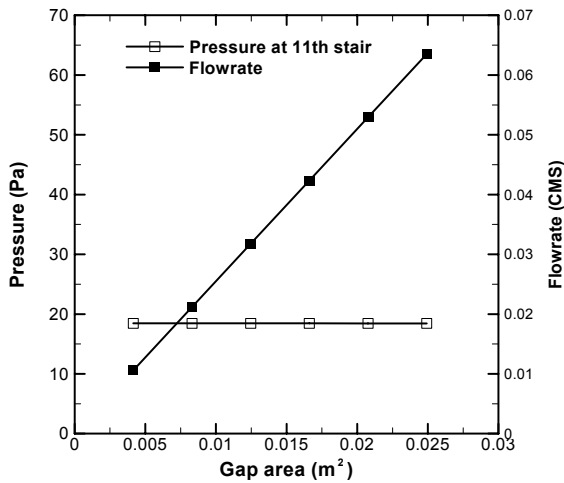


Fig. 9 Pressure at 11th stair and leakage flowrate for gap area.

한편 Fig. 9는 -10°C의 동일한 외기온도에 대해서 출입문의 틈새면적을 변화시켜가며 수행한 수치해석의 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 해석에서 고려한 범위에서 틈새면적이 변화하여도 계단 11층에서의 압력은 거의 변화하지 않으며, 출입문 틈새의 누설유량은 틈새면적에 대해 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 건축물내 구획실간 틈새에서의 누설유동에 대해서 수치해석 적용 모델을 제시하였고 이를 이용해서 건축물 계단에서의 연돌효과에 대한 3차원 수

치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 3차원 전산유체 수치해석에서는 구획실간 틈새 영역에 대해서 압력저하가 통과유속에 비례하도록 하는 Momentum Loss Model을 적용하면 틈새유동의 현상을 효과적으로 반영할 수 있다.
- (2) 틈새 누설유동의 수치모델을 적용한 구획실 2개소의 해석결과, 구획실 A의 유입구에서 들어온 공기가 출입문의 틈새를 통과하여 구획실 B로 흐르는 유동현상이 적절하게 재현되었다.
- (3) 틈새 누설유동의 수치모델을 적용한 구획실 2개소의 해석결과, 주어진 누설유량에 대응해서 형성되는 압력차에 대해서 Orifice Equation과 수치해석의 결과값이 거의 일치하고 있으므로 Momentum Loss Model을 적용한 3차원 수치해석 모델이 틈새의 누설유동을 적절히 구현하고 있다.
- (4) 계단에서의 연돌효과에 대한 해석결과, 실내온도가 20°C이고 외기온도가 -10°C인 조건에서는 계단 1층에서 약 -18 Pa정도의 부압이 형성되고 계단 11층에서 약 20 Pa정도의 양압이 형성된다. 한편 외기온도가 10°C인 조건에서는 계단 1층에서 약 -6 Pa정도의 부압이 형성되고 계단 11층에서는 약 7 Pa정도의 양압이 형성된다. 이와 같은 결과로부터 누설유동 해석모델이 연돌효과의 해석에 적절하게 적용될 수 있다고 판단된다.
- (5) 계단에서의 연돌효과에 대한 해석결과, 동일한 실내온도 및 출입문 틈새면적의 조건에서 외기온도가 낮아질수록 계단 11층에서 형성되는 압력이 높아지며, 출입문 틈새를 통과하는 누설유량도 증가한다.
- (6) 계단에서의 연돌효과에 대한 해석결과, 동일한 실내온도 및 외기온도의 조건에서 출입문 틈새의 면적이 변화하여도 계단 11층에서 형성되는 압력은 거의 변화하지 않는다. 반면 압력차가 일정하기 때문에 출입문 틈새를 통과하는 누설유량은 출입문 틈새의 면적에 대해 선형적으로 증가하는 관계가 있다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “(13주요) 대공간의 대용량 연기제어 설비기술 개발” 과제의 지원으로 이루어진 것으로서 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Yang, I. H., Yeo, M. S., Jo, J. H., and Kim, K. W., 2002, Simulation of the stack effect in high-rise

- buildings, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 456-467.
2. Lee, K. H., Kim, S. M., Park, Y. H., Moon, J. S., and Sohn, J. Y., 2005, A study on the air tightness performance and stack effect characteristics in high-rise apartment, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 21, No. 12, pp. 279-286.
 3. Kim, I. Y. and Kwon, C. H., 2013, The leakage crack calculation of the fire door and the stack effect analysis, Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 27, No. 2, pp. 46-53.
 4. Kim, J. Y. and Shin, H. J., 2010, Numerical analysis on pressurization system of smoke control in consideration of flow rate of supply and leakage, Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 87-93.
 5. Kim, Y. D. and Kim, K. W., 2003, Simulation of the kitchen and bathroom exhaust systems in high-rise apartment buildings, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 996-1006.
 6. Leigh, S. B., 1995, An evaluation of airtightness performance and analysis of energy savings potential in apartment housing, Solar Energy, Vol. 15, No. 3, pp. 119-125.
 7. Etheridge, D. W., 1977, Crack flow equations and scale effect, Building and Environment, Vol. 12, pp. 181-189.
 8. Baker, P. H., Sharples, S., and Ward, I. C., 1987, Air Flow Through Cracks, Building and Environment, Vol. 22, No. 4, pp. 293-304.
 9. Gross, D. and Haberman, W. L., 1988, Analysis and prediction of air leakage through door assemblies, Fire Safety Science, Proceedings of the 2nd International Symposium, pp. 169-178.
 10. Klote, J. H. and Milke, J. A., 2002, Principles of Smoke Management, ASHRAE/SFPE.
 11. ANSYS, Inc., 2013, ANSYS CFX-Solver Theory Guide.