



## 고층빌딩 연돌 현상의 영향인자 분석

### Analysis of impact factors affecting on the stack effect in high-rise building

오진환\* · 송두삼\*\* · 윤성민\*\*\* · 남유진\*\*\*\*

Oh, Jin-Hwan\* · Song, Doo-Sam\*\* · Yoon, Sung-Min\*\*\* · Nam, Yujin\*\*\*\*

\* Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (dumkin@naver.com)

\*\* Coauthor, Dept. of Architectural Engineering, Sungkyunkwan Univ. South Korea (dssong@skku.edu)

\*\*\* Dept. of Architectural Engineering University of Nebraska-Lincoln, United States (sungminyoon87@gmail.com)

\*\*\*\* Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (namyujin@pusan.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** Recently, high-rise buildings are popular in Korea due to high rate of land usage and cost performance in urban area. However, high-rise building causes several problems such as safety issues, cooling/heating load, stack effect, disaster prevention etc. The stack effect is one of the representative problems. Even though there are many researches on stack effect, there are few studies on design guideline considering local condition. **Method:** This study focuses on the change of pressure distribution according to the design factors which affects the airflow in high-rise residential buildings by simulation analysis. In this study, city, building floor, stairwell door leakage area, elevator door leakage area and changes of layout were considered as the design factor. **Result:** The simulation results indicate that building height and ambient air temperature are significant design factor for stack effect.

© 2016 KIEAE Journal

#### KEYWORD

연돌효과  
압력분포  
설계인자  
누기면적

Stack effect  
Pressure distribution  
Design factor  
Leakage area

#### ACCEPTANCE INFO

Received May 2, 2016

Final revision received June 9, 2016

Accepted June 10, 2016

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

현재, 국토교통부의 '도시계획현황통계자료'를 보면 지난해 우리나라 인구의 91.66%가 도시 지역에 거주하는 것으로 나타났다.<sup>1)</sup> 이러한 인구밀집 현상에 따라 도시 지역의 건축물들도 초고층으로 건축되고 있는 실정이다. 하지만, 초고층 건축물의 보급에 따라 여러 문제들이 발생하고 있다. 연돌현상은 그 중 대표적인 문제점 중 하나이다. 연돌현상은 건물 내·외부 온도차가 큰 경우에 건물 하부에서 차가운 공기가 유입되어 이 공기가 건물 내 수직적 공간(엘리베이터 샤프트, 계단실 등)을 통해 상층부로 상승하며 여러 문제를 유발한다. 예를 들면, 소음(풍절음), 출입문 개폐의 어려움, 승강기 도어 오작동, 공조제어의 어려움, 화재설비의 오작동 등이 그것이다.<sup>2)</sup> 그러나 기존의 연구들은 고층건물에서 연돌효과 문제의 규명에 많이 치중되어 있으며, 그

저감방안, 특히 구체적인 설계 지침에 대한 검토는 부족한 실정이다.

기존 연구로 Yoon S. et. al<sup>3)</sup>은 국내 고층 주상복합아파트에서 한정된 실측결과를 바탕으로 시뮬레이션 입력 데이터를 최적화하는 시뮬레이션 방법을 제안하였다. Maatouk K. et. al<sup>4)</sup>은 중국 하얼빈에 위치한 중간 높이의 건물을 대상으로 풍속에 따른 압력분포를 평가하였으며, 김진수 등<sup>5)</sup>은 연돌효과가 승강기 승강로에 미치는 영향을 확인하여 그 영향을 저감하기 위한 방안을 제시하였다. Yang. D. et. al<sup>6)</sup>은 인접한 공간에서 배출되는 따뜻한 공기흐름이 연돌 효과에 미치는 영향을 평가하고자 시뮬레이션 분석 모델을 개발하였다. Mao. J. C. et. al.<sup>7)</sup>은 CFD(Computational Fluid

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698  
http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2016.16.3.095

- Jin-Youn Lee, Jeong-sng Hahn, Characterization of groundwater temperature obtained from the Korean national groundwater monitoring stations: Implications for heat pumps, Journal of Hydrology, 2006, pp.514-526
- Doosam Song, Hyunwoo Lim, Joonghoon Lee, Jungmin Seo, Application of the mechanical ventilation in elevator shaft space to mitigate stack effect under operation stage in high-rise buildings, Indoor and Built Environment, Vol. 23(1), 2014, pp. 81-91.

- Sungmin Yoon, Jungmin Seo, Wanghee Cho, Doosam Song, A calibration method for whole-building airflow simulation in high-rise residential buildings, Building and Environment, Vol. 85, 2015, pp. 253-262.
- Maatouk Khoukhi, Hiroshi Yoshino, Jing Liu, The effect of the wind speed velocity on the stack pressure in medium-rise building in cold region of China, Building and Environment, 2007, pp. 1081-1088
- Jin-Soo Kim, Eui-Pyeong Lee, Study on the method of stack effect mitigation by the elevator shaft pressurization at high-rise buildings, Transactions of Korean Institute of Fire Science and Engineering, 2011, pp. 178-183 / 김진수, 이의평, 고층 건물에서 승강기 승강로 가압을 통한 연돌효과 저감 방법에 대한 연구, 한국화재소방학회 논문집, 2011, pp. 178-183
- Dong Yang, Tao Du, Shini peng, Baizhan Li, A model for analysis of convection induced by stack effect in a shaft with warm airflow expelled from adjacent space, Energy and Buildings, 2013, pp. 107-115
- Jiachen Mao, Wenwen Yang, Naiping Gao, The transport of gaseous pollutants due to stack and wind effect in high-rise residential buildings, Building and Environment, 2015, pp. 543-557

Dynamics)와 CONTAM을 연동한 시뮬레이션을 통하여 풍향 조건에 따른 실내공기 유동을 확인하였다.

현장실험 및 실측을 수행한 연구로 김정엽 등<sup>8)</sup>은 피난 계단에서 연돌효과 저감 방안을 도출, 순환형 연돌효과 저감방안을 제시하고, 3차원 수치해석 기법을 이용하여 제시된 방안의 실효성을 파악하였다. Naoto, S. M. et. al.<sup>9)</sup>는 고층 사무실 건물을 대상으로 시간, 실내 외 온도차, 실외 풍속에 따른 압력분포를 분석하여 장기운전 시 온도차가 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

하지만, 연돌효과에 영향을 주는 설계인자의 영향도 평가 및 그 영향도를 정량적으로 분석한 연구는 드물다. 또한, 연돌효과를 저감하기 위하여 저층부 공용 공간과 고층부 구획 분할, 엘리베이터 전실 설치, 방풍실 및 회전문 설치 등 설계 및 기밀 성능에 관한 지침은 있지만, 지역조건에 따라 연간 최저 온도와 연평균 온도 등이 다르기 때문에 기존에 제시된 설계 지침을 모든 건물에 그대로 적용하기 어려운 실정이다. 외기 온도에 따라 압력부하가 달라지므로 방풍실 및 엘리베이터 전실 등 추가 구획 등을 일괄적으로 설치하기 보다는 각 건물의 높이나 기밀성능에 맞는 대책을 적용해야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 연돌효과에 의한 문제점을 설계 초기단계에서 고려하여 설계상의 오류와 시공 후의 문제점을 미연에 방지할 수 있도록, 설계인자가 연돌효과에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. Fig. 1은 연돌효과 개념도를 나타낸다.

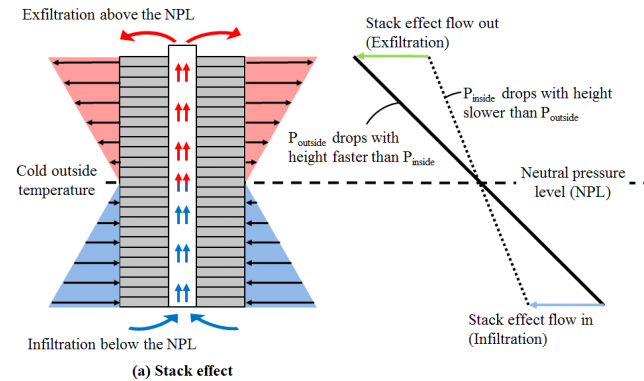


Fig. 1. Schematic diagram of stack effect<sup>10)</sup>

## 2. 연구방법

### 2.1. 시뮬레이션 개요

본 연구의 대상 건축물은 부산광역시에 건축 예정인 초고층 아파

트로서 지하 2층, 지상 45층으로 약 150m의 높이를 가지고 있다. 기준층은 Fig. 2, 3과 같이 엘리베이터 샤프트와 계단실을 기준으로 양측에 세대들이 위치하고 있다. 한편, 대상 건물의 지하층은 지하 주차장을 통하여 외부와 직접적으로 연결되어 있으며, 지하에서 옥상까지 엘리베이터 샤프트로 바로 연결되어 있어 유입된 하층부의 외기가 수직적 공기유동 경로를 통해 건물 상층부로 유입될 수 있다.

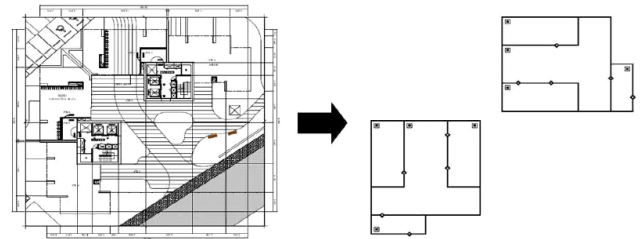


Fig. 2. Core floor plan and simulation model

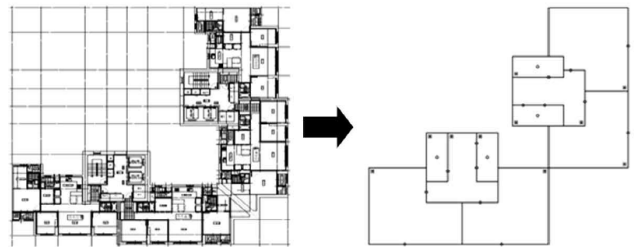


Fig. 3. Standard floor plan and simulation model

본 연구에서는 연돌효과와 그 저감방안을 고찰하기 위하여 외기온도 등 외부 환경적 요인과 출입문, 엘리베이터 문의 기밀성능 등 설계인자 등에 따른 건물 내 공기유동 및 압력 분포를 계산하기 위하여 네트워크 시뮬레이션 프로그램인 NIST에서 개발한 CONTAM 3.1을 활용하였다. 본 해석 프로그램의 신뢰성에 관해서는 Mao, J. C. et. al.<sup>7)</sup>이 AHSHRAE Handbook을 토대로 CFD 모델과 CONTAM 모델 비교하여 모델의 신뢰성을 검증하였으며, W. W. Yang, et. al<sup>11)</sup>도 CONTAM 모델의 공기유동 경로 및 속도를 CFD 모델과 비교하여 CONTAM 모델의 타당성을 증명하였다. 본 논문에서는 기존 연구에서 검증된 해석 프로그램을 이용하여 설계인자가 연돌 현상에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다.

### 2.2. 시뮬레이션 조건

본 연구에서의 외기 온도는 겨울철 설계 최저 외기온도로 기상청의 지난 30년(1981년 ~ 2010년) 평년값 자료를 기준으로 각각 서울  $-6.5^{\circ}\text{C}$ , 부산  $-1.4^{\circ}\text{C}$ , 제주  $2.5^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. 풍압 조건은 0으로 하여 외부바람의 영향을 고려하지 않았다. 한편, 연돌효과 저감 방안으로 아파트의 특성상 제한된 공간과 미관, 빈번한 출입으로 인하여 구획추가 방안은 최소화하였다. 적용된 저감방안은 옥탑층의 방풍실 구획, 지하층의 주출입문에 자동문

8) Jung-Yup Kim, Ji-Seok Kim, Study on 3D Numerical Analysis of Stack Effect Reduction in Stairwell of Building, Korean Journal Of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 2015, pp. 152-157 / 김정엽, 김지석, 건축물 계단에서의 연돌효과 저감방안에 대한 3차원 수치해석 연구, 설비공학논문집, 2015, pp. 152-157

9) Naoto SHINOMIYA, Satoru TAKADA, Tomoaki USHIO, Study on ventilation in high-rise building based on pressure differences measured at elevator doors, Energy Procedia, 2015, pp. 2712-2716

10) Handegord, G.O. "A New Approach to Ventilation of High Rise Apartments" Proceedings of the Eighth Conference on Building Science and Technology, Ontario Building Envelope Council, 2001.

11) W. W. Yang, N. P. Gao, The transport of gaseous pollutants due to stack effect in high-rise residential buildings, International Journal of Ventilation, Vol. 14, pp. 191-208, 2015

으로 설치하였다. 시뮬레이션 조건으로 엘리베이터 샤프트 및 전실, 계단실의 실내 온도는 15°C, 세대 실내 온도는 20°C로 하였으며, 실내 기밀성능은 선행연구<sup>12)</sup>에서 실측한 데이터를 참조하여 설정하였다. 공기유동경로의 누기면적은 Table. 1과 같다.

Table 1. Air flow path of the building

Floor	Building component	Leakage area (cm <sup>2</sup> )
B2	Main vestibule door	3685.32
B1	Main vestibule door	3685.32
1 <sup>st</sup>	Main vestibule door	3685.32
	Vestibule door	3685.32
All floors	Household entrance door	70

시뮬레이션은 국내·외 선행연구 및 사례 조사를 통하여 건물 내의 공기유동에 영향을 주는 인자(온도, 높이, 기밀성능)들과, 지하층과 1층의 구획분할을 중심으로 압력분포를 분석하였다. 기밀성능에 따른 영향을 평가하기 위하여 엘리베이터 문의 기밀성능은 누기면적 범위(225.71cm<sup>2</sup> ~ 1001.14cm<sup>2</sup>)<sup>13)</sup>내에서 250cm<sup>2</sup>, 500cm<sup>2</sup>, 750cm<sup>2</sup> 3가지로 설정하였으며, 계단문의 기밀성능은 누기면적 범위(64.31cm<sup>2</sup> ~ 352.09cm<sup>2</sup>)<sup>14)</sup>내에서 70cm<sup>2</sup>, 210cm<sup>2</sup>, 350cm<sup>2</sup> 3가지로 설정하였다. 또한, 높이에 따른 영향을 평가하기 위하여 건물의 높이에 변화를 주어 45층, 47층, 50층으로 설정하였으며, 지역에 따른 영향을 평가하기 위하여 서울(외기온도 : -6.5°C), 부산(-1.4°C), 제주(2.5°C)로 설정하였다.

또한, 구획분할이 건물의 압력분포에 미치는 영향을 평가하기 위

하여 지하층 로비와 1층 로비에 전실에 추가구획으로 자동문을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우를 비교하였다. 또한, 실내의 압력차가 가장 큰 것으로 예상되는 옥탑층 및 지하층에 대해 추가구획 여부에 따른 압력분포를 검토하였다. Table. 2는 검토케이스를 나타낸다.

Table 2. Case conditions

	City	Floor	Stairwell door leakage area (cm <sup>2</sup> )	Elevator door leakage area (cm <sup>2</sup> )
Case 1	Busan	45F	70	250
Case 2				500
Case 3				750
Case 4			210	250
Case 5				500
Case 6				750
Case 7			350	250
Case 8				500
Case 9				750
Case 10			47F	70
Case 11	50F			
Case 12	Seoul	45F	70	250
Case 13	Jeju			

	City	Floor planning characteristics		
		additional door in the basement floor lobby (automatic door)	additional door in the first floor lobby (automatic door)	Rooftop entrance door (swing)
Case 14	Busan	X	X	X
Case 15	Busan	O	X	O
Case 16	Busan	O	O	O

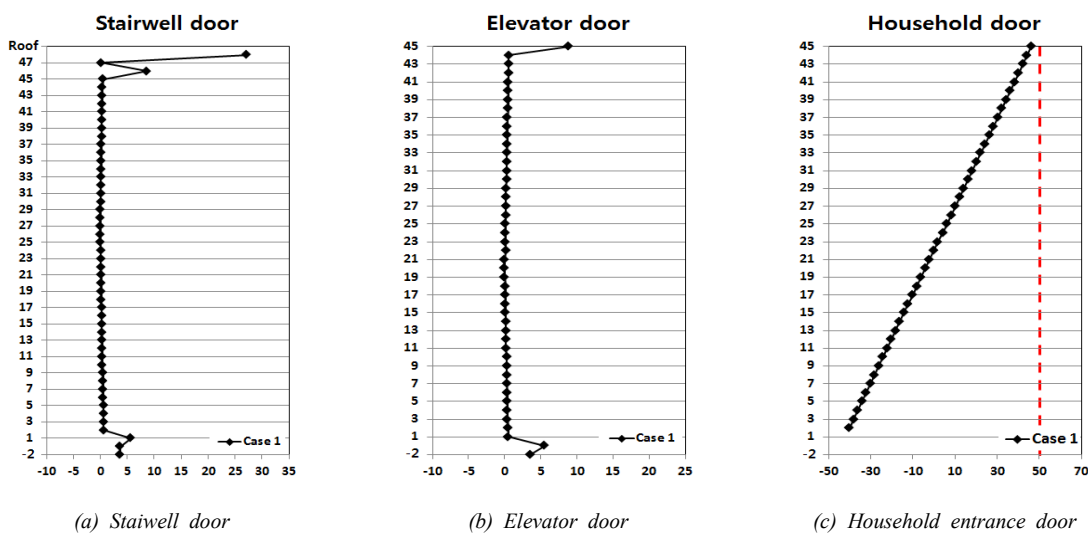


Fig. 4. Simulation result (case 1)

12) Sungmin Yoon, Jungmin Seo, Wanghee Cho, Doosam Song, A calibration method for whole-building airflow simulation in high-rise residential buildings, Building and Environment, 2015, pp. 253-262  
 13) Tamura G. T., Shaw C. Y., Air leakage data for the design of elevator and stair shaft pressurization system, ASHRAE Transactions, 1976  
 14) Tamura G. T., Shaw C. Y., Air leakage data for the design of elevator and stair shaft pressurization system, ASHRAE Transactions, 1976

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1. Base case의 해석결과

Fig. 4는 Case 1의 해석결과를 나타낸다. 본 연구에서는 연돌효과의 영향도 평가를 위하여, 실생활에 밀접한 영향을 가지는 각종 문(계단실 문, 엘리베이터 문, 세대 현관문)의 압력차를 중심으로 시뮬레이션 결과를 분석하였다. 기존 연구<sup>15), 16)</sup>를 통하여 각 부위별 적정 압력차 기준으로 층별 엘리베이터 문은 25Pa 이하, 계단실 문 및 세대 현관문은 50Pa 이하를 기준으로 평가하였다. 분석 결과, 층별 엘리베이터 문과 계단실 문 및 세대 현관문 모두 압력차 허용범위 내에 있었다.

#### 3.2. 엘리베이터 문의 기밀성능에 따른 해석 결과

Fig. 5~7은 엘리베이터 문의 기밀성능에 따른 각 문의 압력분포를 나타낸다. 엘리베이터 문의 누기면적에 따른 각 층별 압력분포를 확인하기 위하여 Case 1부터 3까지 엘리베이터 문의 누기면적을 각각 250cm<sup>2</sup>, 500cm<sup>2</sup>, 750cm<sup>2</sup>로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

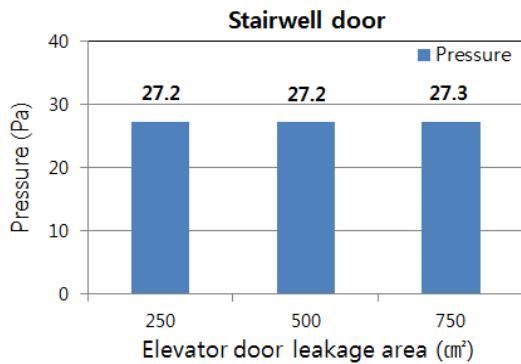


Fig. 5. Pressure distribution of the stairwell door

계단문의 압력차의 경우 옥탑층에서 가장 높은 27.3Pa로 나타나 기준 안에 수용되었으며, 엘리베이터가 없는 층이므로 엘리베이터 문의 누기면적 변화와 관계없이 각 Case의 차이가 미미하게 나타났다. 세대 현관문의 압력차의 경우 45층에서 최대

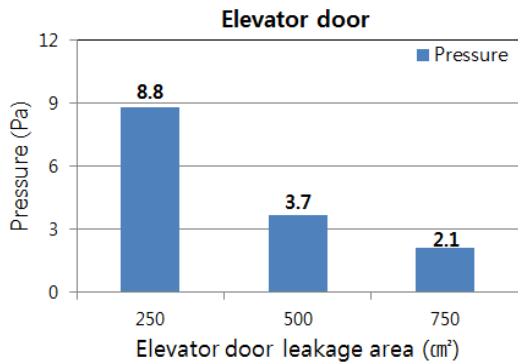


Fig. 6. Pressure distribution of the elevator door

46.8Pa로 기준 안에 수용하였으며 그 차이는 미미하였다. 또한, 엘리베이터 문의 압력차는 45층에서 가장 높은 8.8Pa로 기준 안에 수용하였으며, 엘리베이터 누기면적이 증가할수록 압력차는 감소하였다.

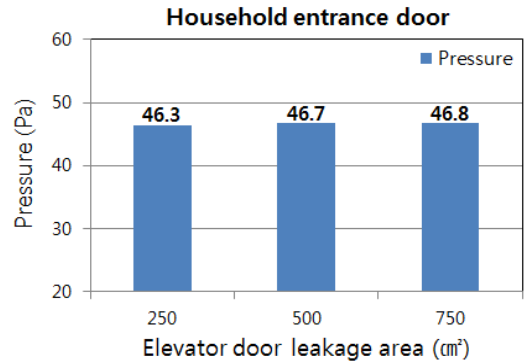


Fig. 7. Pressure distribution of the household entrance door

#### 3.3. 계단실 문의 기밀성능에 따른 해석 결과

Fig. 8~10은 계단실 문의 기밀성능에 따른 각 문의 압력분포를 나타낸다. 계단실 문의 누기면적에 따른 각 층별 압력분포를 확인하기 위하여 Case 1, 4, 7의 계단문 누기면적을 각각 70cm<sup>2</sup>, 210cm<sup>2</sup>, 350cm<sup>2</sup>로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

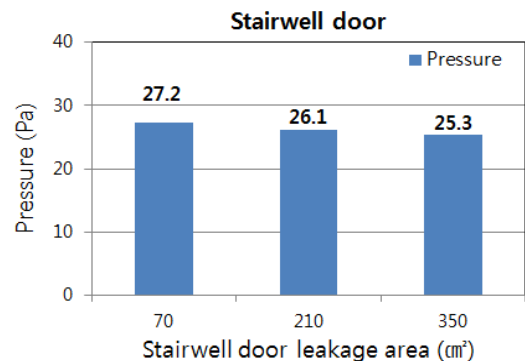


Fig. 8. Pressure distribution of the stairwell door

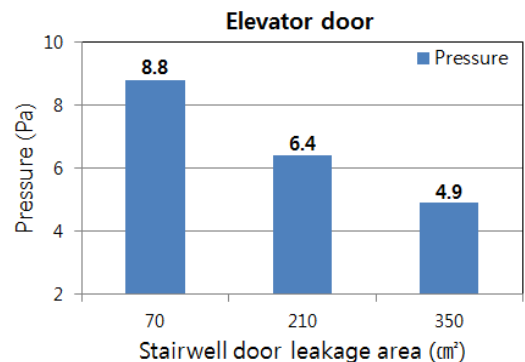


Fig. 9. Pressure distribution of the elevator door

계단실 문의 압력차의 경우 옥탑층에서는 최대 27.2Pa, 세대 현관문의 압력차는 45층에서 최대 46.3Pa로 나타났으며, 계단

15) ASHRAE, Field Verification and Simulation of Problems Caused by Stack Effect in Tall Buildings, ASHRAE Research Project, 1993, pp. 33  
 16) Tambllyn, R. T., Coping with Air Pressure Problems in Tall Buildings, ASHRAE Transactions, 1991, pp. 826

문의 누기면적이 증가할수록 압력차는 감소하였다. 또한, 엘리베이터 문의 압력차의 경우 압력차가 가장 큰 Case 1과 가장 작은 Case 7은 약 80%의 차이가 나지만, 엘리베이터 기계에 오작동을 줄 수준은 아니었다.

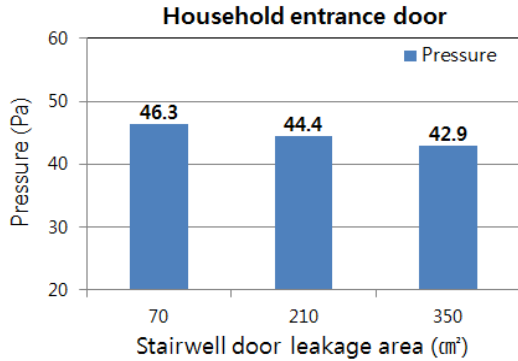


Fig. 10. Pressure distribution of the household entrance door

현관문의 압력차의 경우 Case 11에서 51.5Pa로 나타났다. 이 경우, 과도한 압력으로 인한 문의 개폐에 문제를 초래할 수 있으므로 부산 지역에서 50층 이상의 건축물을 설계할 경우 각 홀의 구획 및 각 문의 기밀성능에 대한 고려가 필요할 것이다.

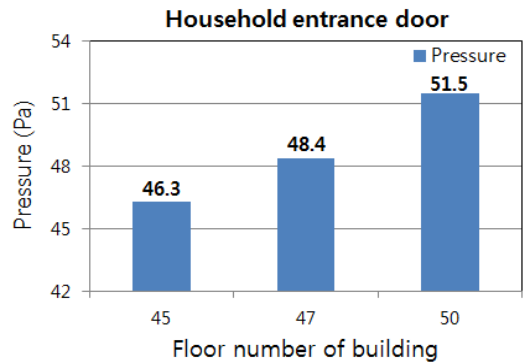


Fig. 13. Pressure distribution of the household entrance door

### 3.4. 건물 층수에 따른 해석 결과

Fig. 11~13는 건물 층수에 따른 각 문의 압력분포를 나타낸다. 건물 층수에 따른 각 층별 압력분포를 확인하기 위하여 Case 1, 10 11의물 층수를 각각 45층, 47층, 50층으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

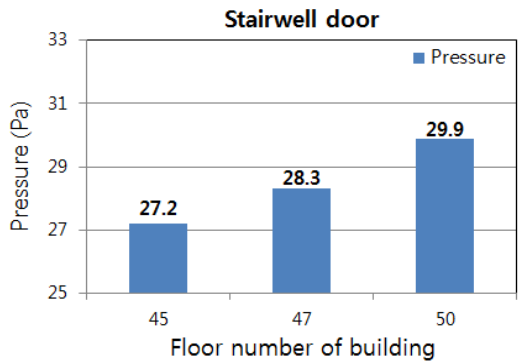


Fig. 11. Pressure distribution of the stairwell door

### 3.5. 지역에 따른 해석 결과

Fig. 14~16은 지역에 따른 각 문의 압력분포를 나타낸다. 지역에 따른 각 층별 압력분포를 확인하기 위하여 Case 1, 12, 13을 각각 부산(외기온도 : -1.4℃), 서울(-6.5℃), 제주(2.5℃)로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

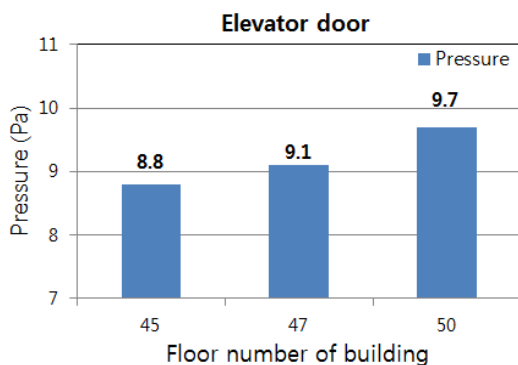


Fig. 12. Pressure distribution of the elevator door

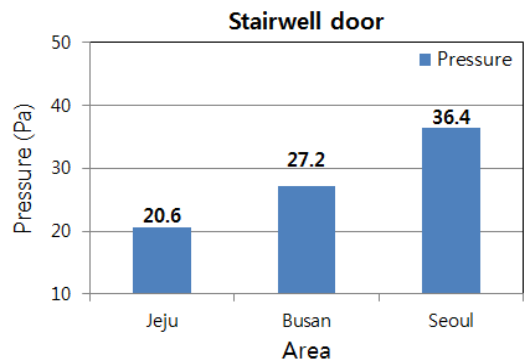


Fig. 14. Pressure distribution of the stairwell door

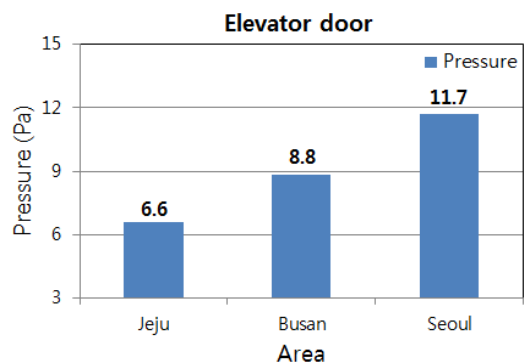


Fig. 15. Pressure distribution of the elevator door

계단실 문의 압력차의 경우 옥탑층에서 최대 29.9Pa, 엘리베이터 문의 압력차는 50층에서 최대 9.7Pa로 기준 안에 수용하였으며 건물 층수가 높아질수록 압력차도 증가하였다. 또한, 세대

북쪽 지역(낮은 외기온)일수록 높은 압력차를 나타냈으며, 계단실 문 및 엘리베이터 문의 압력차는 부산, 서울, 제주 모두 기준

안에 수용하였으나, 세대 현관문의 경우 서울지역의 45층에서 최대 61.9Pa로 나타나 기준을 초과하였다. 이처럼 각 지역마다 같은 층에 걸리는 압력이 다르므로 초고층 건축물에 대한 일괄적인 설계 지침이 아니라 각 지역에 맞는 설계 지침에 대한 고려가 필요하다.

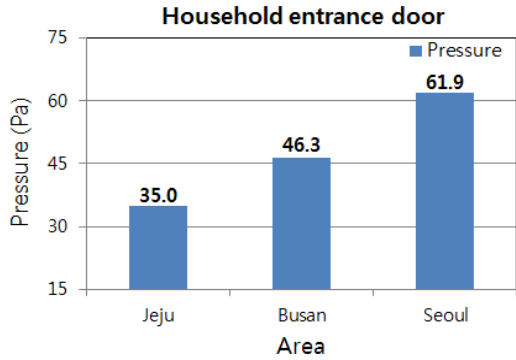


Fig. 16. Pressure distribution of the household entrance door

3.6. 구획추가에 따른 해석 결과

Fig. 17, 18는 구획추가에 따른 각 문의 압력분포를 나타낸다. 구획변경에 따른 각 층별 압력분포를 확인하기 위하여 옥탑층 방풍실만 구획된 Base case인 Case 1과 옥탑방 방풍실이 설치되지 않았을 경우인 14, 옥탑층 방풍실과 지하층 로비에 전실을 추가 구획한 15, 3곳의 구획을 모두 추가한 16를 대상으로 시뮬레이

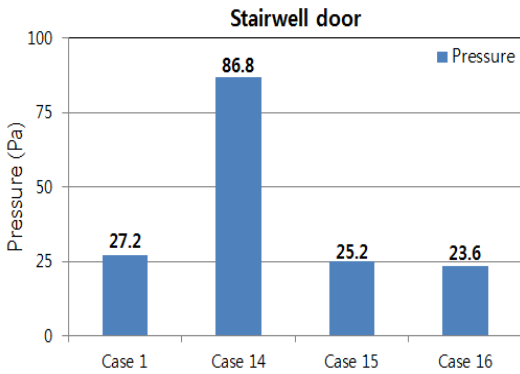


Fig. 17. Pressure distribution of the stairwell door

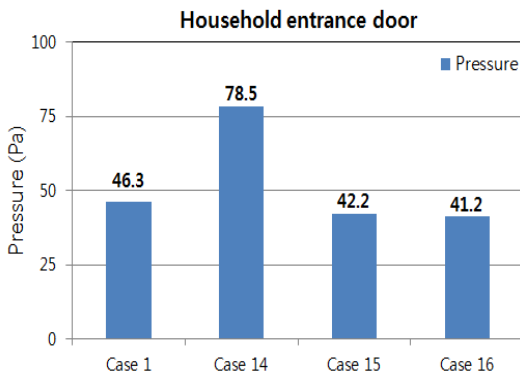


Fig. 18. Pressure distribution of the household entrance door

션을 수행하였다.

계단문의 압력차의 경우 Case 14가 옥탑층에서 86.8Pa로 나타나 기준을 초과하였으며, 가장 낮은 Case 16보다 약 72.8% 높게 나타났다. 한편, 엘리베이터 문의 압력차의 경우, Case 14가 45층에서 최대 10.5Pa를 나타내 기준안에 수용하였다. 세대 현관문 압력차의 경우 Case 14가 45층에서 78.54Pa로 기준을 초과하였으며, 가장 낮은 Case 16에 비해 약 48% 더 높게 나타났다.

이 결과를 토대로 구획의 변경이 다른 설계인자에 비하여 압력 분포에 미치는 영향이 크다는 것을 확인하였다. 특히, 추가 구획이 필요할 경우 옥탑층 방풍실의 구획이 건축물의 미관 및 시공비를 고려하였을 때 가장 적절할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 연돌효과에 의한 문제점을 설계 초기단계에서 고려하여 설계상의 오류와 시공 후의 문제점을 미연에 방지할 수 있도록, 연돌효과에 영향을 주는 건축적 설계인자에 대한 영향분석을 수치해석 방법을 통해 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 엘리베이터 문의 기밀성능에 따른 각 문의 압력분포 분석결과, 기밀하게 시공될수록 엘리베이터 문의 압력차는 높게 나타났다으며, 세대 현관문은 낮게 나타났으나 그 차이는 미미하였다.

둘째, 계단실 문의 기밀성능에 따른 각 문의 압력분포 분석결과, 계단실 문의 누기면적이 증가할수록 계단실 문 및 세대 현관문의 압력차는 동일하였으며, 엘리베이터의 압력차는 감소하였고 그 차이는 최대 약 66%로 나타났다.

셋째, 지역에 따른 각 문의 압력분포 분석 결과, 북쪽 지역일수록 높은 압력차를 나타냈으며, 각 지역별로 세대 현관문의 압력차가 최대 약 43%의 차이를 나타냈다. 이 결과를 토대로 초고층 건축물 설계에 있어, 일괄적인 지침이 아닌 각 지역별 기후조건을 고려한 설계 지침이 필요하다고 판단된다.

다섯째, 구획추가에 따른 압력분포 분석 결과, 공기유동 경로에 전실이 설치되지 않은 경우와 설치된 경우를 비교하였을 때, 세대 현관문의 압력차가 최대 약 48%의 차이를 나타냈다.

향후, 설계 실무자들이 초고층 건축물 설계에 있어, 설계상 오류를 미연에 방지할 수 있도록 보다 다양한 설계인자들과 압력분포의 상관관계를 정량적으로 분석하여 간이 설계툴을 개발할 예정이다.

Acknowledgement

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

Reference

[1] Jin-Youn Lee, Jeong-sng Hahn, Characterization of groundwater temperature obtained from the Korean national groundwater monitoring stations: Implications for heat pumps, Journal of Hydrology, 2006,

- pp.514-526
- [2] Doosam Song, Hyunwoo Lim, Joonghoon Lee, Jungmin Seo, Application of the mechanical ventilation in elevator shaft space to mitigate stack effect under operation stage in high-rise buildings, *Indoor and Built Environment*, Vol. 23(1), 2014, pp. 81-91.
  - [3] Sungmin Yoon, Jungmin Seo, Wanghee Cho, Doosam Song, A calibration method for whole-building airflow simulation in high-rise residential buildings, *Building and Environment*, Vol. 85, 2015, pp. 253-262.
  - [4] Maatouk Khoukhi, Hiroshi Yoshino, Jing Liu, The effect of the wind speed velocity on the stack pressure in medium-rise building in cold region of China, *Building and Environment*, 2007, pp. 1081-1088
  - [5] Jin-Soo Kim, Eui-Pyeong Lee, Study on the method of stack effect mitigation by the elevator shaft pressurization at high-rise buildings, *Transactions of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, 2011, pp. 178-183 / 김진수, 이의평, 고층건물에서 승강기 승강로 가압을 통한 연돌효과 저감 방법에 대한 연구, 한국화재소방학회 논문집, 2011, pp. 178-183
  - [6] Dong Yang, Tao Du, Shini peng, Baizhan Li, A model for analysis of convection induced by stack effect in a shaft with warm airflow expelled from adjacent space, *Energy and Buildings*, 2013, pp. 107-115
  - [7] Jiachen Mao, Wenwen Yang, Naiping Gao, The transport of gaseous pollutants due to stack and wind effect in high-rise residential buildings, *Building and Environment*, 2015, pp. 543-557
  - [8] Jung-Yup Kim, Ji-Seok Kim, Study on 3D Numerical Analysis of Stack Effect Reduction in Stairwell of Building, *Korean Journal Of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 2015, pp. 152-157 / 김정엽, 김지석, 건축물 계단에서의 연돌효과 저감방안에 대한 3차원 수치해석 연구, 설비공학논문집, 2015, pp. 152-157
  - [9] Naoto SHINOMIYA, Satoru TAKADA, Tomoaki USHIO, Study on ventilation in high-rise building based on pressure differences measured at elevator doors, *Energy Procedia*, 2015, pp. 2712-2716
  - [10] Handegord, G.O. "A New Approach to Ventilation of High Rise Apartments" *Proceedings of the Eighth Conference on Building Science and Technology*, Ontario Building Envelope Council, 2001.
  - [11] W. W. Yang, N. P. Gao, The transport of gaseous pollutants due to stack effect in high-rise residential buildings, *International Journal of Ventilation*, Vol. 14, pp. 191-208, 2015
  - [12] Sungmin Yoon, Jungmin Seo, Wanghee Cho, Doosam Song, A calibration method for whole-building airflow simulation in high-rise residential buildings, *Building and Environment*, 2015, pp. 253-262
  - [13] Tamura G. T., Shaw C. Y., Air leakage data for the design of elevator and stair shaft pressurization system, *ASHRAE Transactions*, 1976
  - [14] ASHRAE, Field Verification and Simulation of Problems Caused by Stack Effect in Tall Buildings, *ASHRAE Research Project*, 1993, pp. 33
  - [15] Tamblyn. R. T., Coping with Air Pressure Problems in Tall Buildings, *ASHRAE Transactions*, 1991, pp. 826