

고층건물에서의 연돌효과 시뮬레이션

양인호[†], 여명석^{*}, 조재훈^{**}, 김광우^{**}

서울대학교 공학연구소, ^{*}성균관대학교 건축공학과, ^{**}서울대학교 건축학과

Simulation of the Stack Effect in High-Rise Buildings

In-Ho Yang[†], Myoung-Souk Yeo^{*}, Jae-Hun Jo^{**}, Kwang-Woo Kim^{**}

Research Institute of Engineering Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

^{*}Department of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

^{**}Department of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received April 13, 2002; revision received April 24, 2002)

ABSTRACT: The objective of this study is to analyze and evaluate the impact of the stack effect in high-rise buildings for solving the various problems resulting from it. For the evaluation of the impact of the stack effect, computer program simulations based on the network model were performed for a typical high-rise office building. The results of the simulations show that the impact caused by the stack effect is mainly dependent on building envelope air-tightness and internal airflow resistance, so the problems due to the stack effect may be solved to some extent by installing vestibules around entrance doors and doors serving elevators, and by zoning the elevators.

Key words: Stack effect(연돌효과), Pressure difference(압력차), Network model(네트워크 모델), High-rise building(고층건물), Airflow analysis(공기유동 분석)

기호설명

- $F_{k,j}$: 존 k 에서 j 로의 공기유동량 [kg/s]
- g : 중력가속도 9.81 [m/s²]
- h : 측정점 높이 [m]
- m_j : 존 j 에서의 공기질량 [kg]
- N : 중성대(neutral pressure level) 높이 [m]
- P : 압력 [Pa]
- ΔP_{st} : 연돌효과로 인한 압력차 [Pa]
- R : 기체상수 [J/kgK]
- T : 실내온도 [K]

- t : 시간 [sec]
- V_j : 존 j 의 용적 [m³]

그리스 문자

- ρ : 공기밀도 [kg/m³]
- ν : 동점성 계수

하첨자

- i : 실내
- j : 존 j
- k : 존 k
- o : 실외

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-880-7066; fax: +82-2-885-8057

E-mail address: forinho@hanmail.net

1. 서 론

최근 국내에서 고층건물이 많이 증가하고 있으며, 고층건물의 경우 건물 내에 엘리베이터 샤프트와 같은 각종 샤프트 및 계단실 등 공기의 수직 유동경로를 가지고 있다. 여기서 겨울철의 경우 큰 실내외 온도차로 인한 건물 내외부의 압력차로 인해 저층부에서 공기가 유입되며, 유입된 공기는 수직 유동경로를 따라 상승하는 연돌효과가 발생하게 된다. 이러한 연돌효과는 코어부분, 즉 계단실, 엘리베이터 샤프트에서 주로 발생하여 공기의 유출입에 따른 에너지 손실, 엘리베이터 문의 오동작, 코어 부근에 있는 실에서 출입문 개폐의 어려움, 침기 및 누기에 따른 소음, 강한 외기 유입에 의한 불쾌감 유발 등과 같은 많은 문제를 야기한다.

그러나 국내에서는 아직 연돌효과에 대한 인식이 부족하고 이에 대한 연구도 사례분석⁽¹⁾을 제외하고는 미미한 상황이고, 국외의 경우에는 실제 건물이 지어진 다음 연돌효과로 인하여 건물에 생긴 문제점을 해결하는 방안이 연구⁽²⁻⁴⁾되었으나 여기서도 부분적인 해결에 그치고 있고, 연돌효과의 문제점을 해결하기 위해서 기계적 공조 시스템을 조절하여 실내압력을 조절하는 경우⁽⁵⁻⁶⁾도 있으나, 이는 건물 내 다른 곳에서 문제를 야기하고 그 효율도 떨어져서 적절한 해결책이 되지 않는다는 것을 밝히고 있다.

따라서, 건물의 고층화에 따른 연돌효과의 문제를 해결하기 위해서는 건축계획 초기단계에서 이를 고려하여 그 문제를 최소화하는 방향으로 계획이 이루어져야 한다. 이를 위해서는 계획단계에서 이용할 수 있는 연돌효과에 대비한 건축계획 지침이 필요하고, 이러한 지침을 개발하기 위해서는 건물에서의 연돌효과에 대한 전반적인 영향평가가 요구된다.

여기서 연돌효과의 원인이 되는 건물 내외에서 공기유동을 일으키는 힘에는 외부 바람으로 인하여 외피에 작용하는 힘, 실내외 밀도차로 인한 공기의 부력, 기계적 공조에 의한 압력의 변화 등 여러 가지가 있다. 이러한 힘들에 의하여 움직이게 되는 공기는 건물 내의 다양한 경로를 통과하면서 건물 공간별로 각기 다른 압력분포를 일으키게 된다. 따라서, 건물에서 연돌효과의 영향평가를 위한 공기유동 해석을 하기 위해서는

이를 모두 고려할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 우선 공기유동에 영향을 줄 수 있는 중요한 시뮬레이션 인자를 선정 한 후에, 각각의 변수와 입력데이터를 마련하여야 한다. 그리고, 이러한 인자의 변수로는 초기계획단계에서 고려할 수 있는, 즉 설계단계에서 변경 가능한 건축적 요소를 위주로 하는 것이 바람직하다

따라서 본 연구에서는 연돌효과에 의한 문제점을 설계 초기단계에서 고려하여 설계상의 오류와 시공 후의 문제점을 미연에 방지할 수 있도록, 연돌효과에 영향을 주는 건축적 인자들을 선정 한 후, 공기유동해석 시뮬레이션을 통하여 연돌효과의 영향을 평가하고자 한다.

2. 연돌효과에 대한 이론적 고찰

2.1 연돌효과의 원리

연돌효과는 건물 내외부 공기기둥의 무게 차이에 의한 압력차로 발생한다. 이러한 공기의 압력차이 때문에, 건물 내부가 따뜻하고 건물 외부가 차가운 겨울철 지표면상의 외부 기압보다 건물 내부 기압이 낮게 된다. 이 압력차 때문에 지표면상에서 건물로 들어온 공기는 다시 공기의 밀도차로 인해 수직적으로 발생하는 압력차에 의해 건물 내부의 상부로 이동하며, 이는 건물 높이와 건물 상하층부 침기와 누기의 정도에 따라 달라지게 된다.

연돌효과로 인한 이론적인 압력차는 다음 식(1)에 의해서 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_g &= g \Delta \rho (N-h) \\ &= g \rho_o (\Delta T / T_i) (N-h) \end{aligned} \tag{1}$$

2.2 해석 프로그램

본 연구에서는 네트워크 모델 알고리즘을 기본으로 미국 NIST에서 개발하여 지금까지 다수의 연구에 적용되어 신뢰성을 인정받은 CONTAMW 프로그램⁽⁷⁾을 사용하였다.

2.3 연돌효과의 영향 평가 방법

일반적으로 건물의 공기유동은 Table 1과 같은

Table 1 Prediction models of airflow

Models	Control volume	Application
Zone model	one or many numbers	airflow analysis of a large space in a single zone such as atrium or hall
Field model	many mesh points	airflow analysis of a high-rise building having multi-zones and vertical shafts
Network model	one per zone	

여러 가지 방법으로 예측 가능하며, 고층건물과 같이 다중 존으로 구성된 건물에서 외피와 개구부, 실내공간을 통한 공기유동은 건물 부위별 형상, 개구면적 등의 저항에 영향을 받기 때문에, 연돌효과 분석을 위한 공기유동량 예측은 다중 존을 해석하기 위한 네트워크 모델 방법이 적합하다.

네트워크 모델에서 기본 방정식은 각 존 간의 압력차에 의한 공기유동량 함수와 전체 존의 공기유동량의 질량보존관계로 표현될 수 있다.

존 j 에서 존 i 로의 공기유동량과 존 i 에서의 공기유동량은 다음의 식(2), 식(3)과 같다.

$$F_{k,j} = f(P_k - P_j) \quad (2)$$

$$m_j = \rho_j V_j = \frac{P_j V_j}{RT_j} \quad (3)$$

비정상상태의 해석은 질량보존의 법칙에 의하여 다음 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial m_j}{\partial t} = \rho_j \frac{\partial V_j}{\partial t} = \sum_k F_{k,j} \quad (4)$$

공기유동을 준정상상태(quasi-steady condition)로 가정하면 전체 존의 공기유동량은 다음 식(5)와 같다.

$$\sum_k F_{k,j} = 0 \quad (5)$$

여기서 공기유동량은 비선형방정식이므로, 본 프로그램에서는 Newton-Raphson 방법에 의한 반복 계산으로 수치적 해를 구한다.

3. 연돌효과 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 인자 및 변수의 설정

연돌효과의 문제가 많이 발생하는 동절기에 건물 내부에서 나타나는 공기유동의 주경로는 Fig. 1과 같이 크게 공기의 유입부(R1), 공기의 상승부(R2), 공기의 유출부(R3) 등 세 가지 영역으로 구분할 수 있다. 최종적으로 건물 전체를 볼 때, 공기의 유출입이 이루어져 건물의 공기유동에 영향을 주는 건물 외피 부분(R)도 하나의 영역으로 구분할 수 있다.

여기서 국내의 사례조사⁽⁸⁾를 통하여 파악한 설계 초기단계에서 변경 가능한 건축적 요소와 문헌조사를 통하여 검토된 연돌효과에 영향을 주는 여러 인자들을 바탕으로 연돌효과의 영향평가를 위한 시뮬레이션 인자와 변수들을 선정하였으며, 이는 Table 2에 나타나 있다.

3.1.1 시뮬레이션 실내외 조건

외기온은 시간에 따라 변화하지만 가장 연돌효과를 촉진시키는 조건인 겨울철 설계 최저외기온을 기준으로 하였고, 실내온도는 사무소와 공동주택의 난방설계기준 온도를 바탕으로 Table 3과 같이 설정하였다.

3.1.2 시뮬레이션 모델

시뮬레이션 모델 건물은 고층화가 많이 이루어지는 사무소 건물을 대상으로 하였고 이중 실내가 개방형 플랜(open plan)일 경우 코어부와 건물 외피 사이의 공기유동경로에서의 저항요소가 적어, 연돌효과로 인한 문제가 더 심각하므로 이

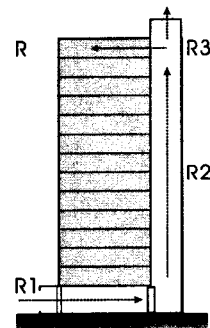


Fig. 1 Main path of airflow.

Table 2 Factors and variables for simulation

Airflow	Factors		Variables
Inflow(R1)	entrance door	vestibule door	$\text{---} \times \text{---}$: swing + swing(S+S)
		general entrance door	$\text{---} \times \text{---}$: swing + revolving(S+R) · swing door(S) · revolving door(R)
Upward flow(R2)	elevator anteroom		yes(O), no(X)
	elevator door		loose(L), average(A), tight(T)
	staircase door		loose(L), average(A), tight(T)
Outflow(R3)	elevator zoning		yes(O), no(X)
	opening of elevator mechanical room		yes(O), no(X)
Building envelope(R)	entrance door of rooftop floor		closed door(Dc), open door(Do), anteroom
	air tightness of envelope		loose(L), average(A), tight(T)
Etc.	number of door on the first floor		see table 9
	elevator zoning		see table 11
	opening rate of upper and lower floors		see table 4(Case V-3)

floor height of lobby: 5.5 m, floor height of typical floor: 4.5 m

Table 3 Indoor and outdoor conditions for simulation

Classification	Conditions	Remarks
Outdoor air temp.	-11.9°C	Seoul, TAC 2.5%
Indoor air temp	22.0°C	Ministry of Construction and Transportation, Design standards of Energy Conservation in Building, 2001.5. [Appendix Table 7]
Temp. difference	33.9°C	22.0 - (-11.9)
Atmospheric pressure	101.30 kPa	standard condition

를 모델로 선정하였다. 실제건물의 건축적 특성을 반영하기 위해서, 최근에 서울에 지어지고 연돌효과로 인한 문제가 발생하였던 사무소와 주상복합건물을 바탕으로 작성하였으며, 건물의 평면은 Fig. 2와 같이 구성되어 있다.

건물의 주향은 정남향으로 1층 로비층에는 남

쪽으로 주출입구가 있고 북쪽으로 후문이 있으며, 각 층의 층고는 1층의 경우 5.5 m, 기준층은 4.5 m로 계획하였다. 기본건물의 높이는 45층으로 계획되어 있으며, 시뮬레이션에서는 필요한 경우에 높이를 변화시켜 가며 연돌효과의 영향을 평가하였다.

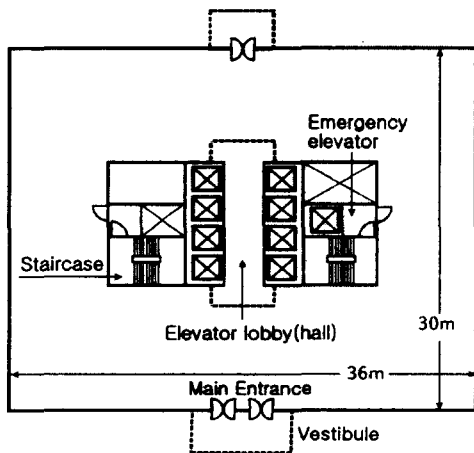


Fig. 2 First floor plan of simulation model.

3.1.3 시뮬레이션 평가기준

연돌효과에 따른 모든 문제점들은 공기유동을 야기시키는 압력차와 관련이 있으므로, 이러한 압력차를 중심으로 문제를 해결해 나가는 방향이 올바른 접근방법이라고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 연돌효과의 영향평가를 위해서, 건물 내의 각종 문에서 문제점을 야기할 수 있는 압력차를 중심으로 시뮬레이션 결과를 평가하였으며, 문헌조사를 통하여 계단실문은 50 Pa⁽³⁾ 압력차, 엘리베이터 문은 25 Pa⁽⁵⁾ 압력차를 기준으로 진행하였다.

3.1.4 시뮬레이션 Case

연돌효과의 영향평가 시뮬레이션은 국내의 사

Table 4 Simulation cases

Airflow	Factors	Case I			Case II		Case III			Case IV		Case V-3		Remarks	
		I-1	I-2	I-3	II-1	II-2	III-1	III-2	III-3	IV-1	IV-2	a	b		
Inflow (R1)	vestibule door	×	×	×	S+R	S+R	S+R	S+R	S+R	S+R	S+R	S+R	opened	 (S+S), (S+R)	
	general entrance door	S+S	S+S	S+S	S+S	S+S	S+S	S+S	S+S	S+S	S+S	S+S	opened		swing door(S), revolving door(R)
	elevator anteroom	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×		yes(○), no(×)
Upward flow (R2)	elevator door	A	A	A	A	A	L, A, T	A	A	A	A	A	A	loose(L), average(A), tight(T)	
	staircase door	A	A	A	A	A	A	L, A, T	A	A	A	A	A	loose(L), average(A), tight(T)	
	elevator zoning	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	yes(○), no(×)	
Outflow (R3)	opening of elevator mechanical room	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×	×	×	yes(○), no(×)	
	entrance door of rooftop floor	1Dc	1Dc	1Dc	1Dc	1Dc	1Dc	1Dc	1Dc	1Dc	1Dc, 1Dc, 2Dc	opened	closed	opened(1Do), closed(1Dc)	
Other (R)	air-tightness of envelope	L	A	T	L, A, T	A	A	A	A	A	A	A	A	loose(L), average(A), tight(T)	
	height	10F~70F			10F~70F			45F			45F		45F		floor height of lobby 5.5 m floor height of typical floor 4.5 m

레조사와 기존 문헌연구에서 분석한 건물 내의 공기유동에 영향을 주는 인자들을 중심으로, 공기유동의 주경로를 따라 변화시켜 가며 진행하였다. 아울러 높이에 따른 연돌효과의 영향을 평가하기 위해서는 주요 인자인 건물의 높이를 5층 단위로 변화를 주었으며, 그 외의 경우에는 건물 높이를 45층으로 고정하였다.

일반적으로 건물 내의 공기유동은 많은 실내외의 인자에 의해서 영향을 받게 되지만, 본 연구는 건축계획단계에서 이를 검토하고 대책을 세울 수 있는 지침개발을 위하여, 건축적 요소에 따른 연돌효과의 영향을 중심으로 시뮬레이션을 진행하였으며, 그 시뮬레이션 Case를 정리하면 Table 4와 같다.

3.2 시뮬레이션 결과분석

3.2.1 외피의 기밀도에 따른 시뮬레이션(Case 1)

사무소 건물의 경우 외피의 재료와 시공 정도에 따라 기밀도는 많은 차이가 나며, 건물이 지어진 후 오랜 시간이 경과할수록 기밀도가 떨어지는 현상에 대해서 보고되어 있다. 이러한 외피의 기밀도를 정확하게 구하기 위한 방법은 해당 외피에 대해 실험을 하여 직접 기밀도를 측정하는 것이다. 그러나, 국내에서는 아직 건물 유형에 따른 외피의 기밀도 관련 데이터가 없으므로, 본 연구에서는 Tamura와 Shaw가 측정하여 ASHRAE⁽⁹⁾에서 채택하고 있는 건물의 기밀도를 기준으로

하여 시뮬레이션을 실시하였다.

Fig. 3은 건물 높이의 변화와 외피의 기밀도에 따라 가장 큰 압력이 걸리는 1층에서의 외피와 엘리베이터 문에 걸리는 압력차를 비교한 것이다. 그 결과를 보면, 건물 외피의 기밀도가 높을수록 실내와 외기, 엘리베이터 샤프트와 실내간의 압력차는 커지고, 이러한 압력차는 건물 높이가 높아질수록 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 외피가 기밀할수록 외피부분에 많은 압력차가 걸리게 되고, 실내에 있는 건축적 요소에는 작은 압력차가 나타나게 된다.

따라서, 외피의 기밀도에 관련해서는 외피가 느슨한(loose) 건물의 경우, 최상층 및 1층의 엘리베이터 문에서 압력차로 인한 문제가 중간(aver-

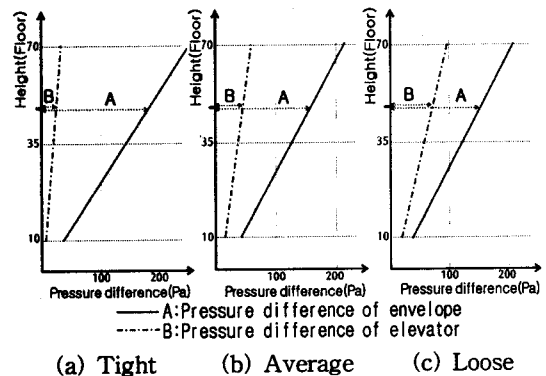


Fig. 3 Pressure differences according to air tightness of envelope on the first floor.

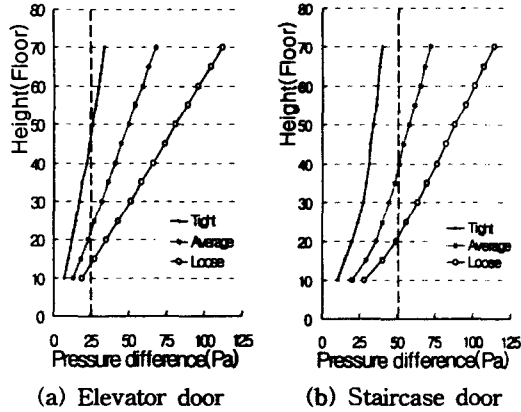


Fig. 4 Pressure differences on the first floor.

age)과 밀실한(tight) 기밀도를 가진 건물의 경우보다 더 낮은 건물 높이에서 발생하고, 실내의 건축적 요소에 걸리는 압력차도 크게 증가하므로, 연돌효과에 대한 대책으로 외피의 기밀도 향상이 가장 중요하다고 판단된다.

Fig. 4는 1층 부분의 코어에 위치한 엘리베이터 문과 계단실 문 안팎의 압력차를 보여주고 있다. 외피의 기밀도가 느슨한 건물에서는 밀실한 건물의 경우보다 2배의 압력이 1층 실내에 작용하여, 건물 외피의 선정과 시공이 중요하다는 것을 알 수 있다.

결과적으로, 본 시뮬레이션 대상 건물의 경우, 밀실한 외피를 가진 건물은 엘리베이터 문에서의 문제가 50층(약 230 m) 이상의 높이에서 발생하였고, 계단실 문의 문제는 발생하지 않았다. 중간 기밀도를 가진 건물의 경우 엘리베이터 문 문제가 23층(약 100 m) 이상, 계단실 문의 문제는 39층(약 180 m) 이상의 건물 높이에서 발생하였다.

3.2.2 공기의 유입부에서의 건축적 요소의 변화에 따른 시뮬레이션(Case II)

외피의 기밀도에 따른 시뮬레이션 결과에서 분석한 코어에서의 출입문에 발생하는 문제들을 해결하기 위한 방향으로 건축적 요소를 변화시켜 연돌효과의 영향을 평가하였다. 외부공기가 직접적으로 실내공기의 상승부분인 코어로 가는 것을 막고 그 양을 줄이기 위해서 유동경로에 건축적 저항요소(방풍실, 엘리베이터 전실)를 차례로 설치하여 연돌효과의 영향평가 시뮬레이션을 실시하였다.

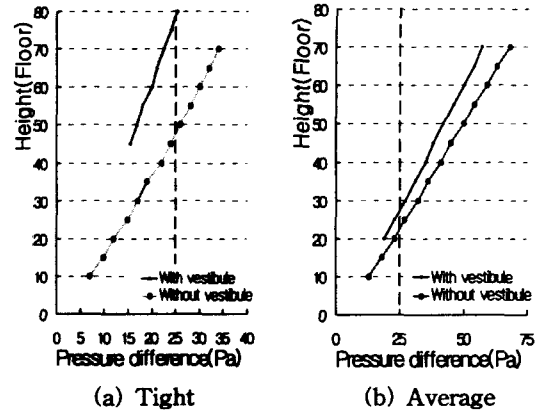


Fig. 5 Pressure differences of elevator door with and without a vestibule.

(1) 출입구에 방풍실을 설치한 경우(Case II-1)
외피의 기밀도에 따른 시뮬레이션(Case I)에서 검토된 계단실 문과 엘리베이터 문의 과도한 압력차 문제를 해결하기 위하여, Case I 모델의 건물 주출입구 부분에 방풍실을 설치하여 그 영향을 평가하였다.

시뮬레이션 결과, 기밀한 외피를 가진 건물의 경우는 방풍실의 설치만으로 50층 이상 높이에서 발생하였던 엘리베이터 문의 압력차 문제를 해결할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 5의 (a) 참조).

중간 기밀도의 외피를 가진 건물의 경우, 엘리베이터 문 안팎의 압력차가 평균 7Pa 정도 감소하여 28층까지는 문제가 발생하지 않았다(Fig. 5의 (b) 참조). 반면, 느슨한 외피를 가진 건물의 경우에는 방풍실을 설치하여도 엘리베이터 문과 계단실 문 안팎의 압력에 거의 영향이 없는 것으로 나타나, 건물 외피의 기밀도가 낮아질수록 방풍실의 설치 효과가 크게 감소하는 것으로 나타났다.

(2) 엘리베이터 전실을 설치한 경우(Case II-2)
Case II-1에서 분석한 느슨한 기밀도의 건물과 중간 기밀도의 외피를 가진 건물에서 방풍실의 설치로 해결하지 못한 엘리베이터 문의 압력차 문제의 해결방안으로, 1층에 있는 엘리베이터 로비에 자동문이 있는 전실을 설치한 경우에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다.

그 결과, 중간 기밀도를 가진 건물의 경우 엘리베이터 전실의 설치로, Case II-1에서 28층 이상 높이에서 발생하는 엘리베이터 문에서의 압력차 문제를 해결할 수 있었다(Fig. 6의 (a) 참조).

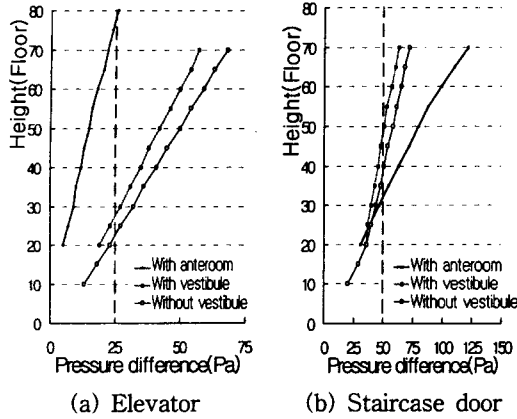


Fig. 6 Pressure differences on the first floor with and without a vestibule.

그러나, 계단실 문의 경우에는 Case II-1에서 방풍실의 설치로 계단실 문 안팎의 압력차가 어느 정도 감소되었지만, 엘리베이터 전실을 두었을 경우에는 오히려 압력차가 과도하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 엘리베이터 전실을 설치하였을 경우, 실내의 공기가 상대적으로 기밀해진 엘리베이터 샤프트보다 계단실로 더 많이 상승하기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 6의 (b) 참조).

느슨한 외피를 가진 건물의 경우에는 엘리베이터 전실을 설치하여도 연돌효과로 인한 압력차 문제해결이 어렵고 그 효과도 떨어지는 것으로 나타나, 이를 해결하기 위해서는 건물 외피의 전반적인 기밀도 향상이 우선적으로 필요하다고 판단된다.

3.2.3 공기의 상승부에서의 건축적 요소의 변화에 따른 시뮬레이션(Case III)

여기서는 건물에서 공기의 수직적 상승부인 코어에 있는 각종 문의 기밀도 변화에 따른 압력변화를 분석하고 이에 따른 문제점을 파악하는 시뮬레이션을 실시하였으며, 여기서 엘리베이터 문과 계단실 문의 기밀도로는 단위면적당 침기면적으로 산정한 Tamura의 데이터⁽¹⁰⁾를 사용하였다.

(1) 엘리베이터 문의 기밀도 변화에 따른 시뮬레이션(Case III-1)

엘리베이터 문의 기밀도를 단위면적당 침기면적에 따라 기밀($0.020 \text{ m}^2/\text{m}^2$)과 중간($0.024 \text{ m}^2/\text{m}^2$), 느슨($0.028 \text{ m}^2/\text{m}^2$)으로 설정하여 연돌효과의 영향을 평가하였다.

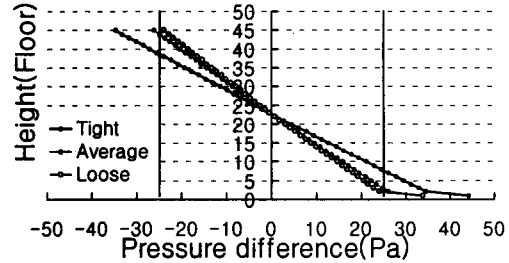


Fig. 7 Pressure differences of elevator door according to air tightness.

각 층에서의 엘리베이터 문에 걸리는 압력을 분석한 결과, Fig. 7에 나타난 것처럼 기밀도가 낮을수록 그 압력차는 감소하는 것으로 나타났다. 중간 기밀도를 가진 45층 높이의 건물에서 엘리베이터 문의 침기량이 적은 경우(tight), 8층 이하와 38층 이상의 엘리베이터 문에서 문제발생 가능성을 보이고 있다. 이는 상부 유출부에서의 누기량과 하층부의 침기량은 변화가 없고, 즉 풍량의 감소는 적은 것에 비해 상대적으로 수직적 샤프트의 공기유동경로인 엘리베이터 문이 기밀해져서, 좁은 침기면적을 통하여 공기가 유출하면서 압력차가 크게 걸리는 현상으로 이해할 수 있다. 이는 앞에서의 엘리베이터 전실 설치시, 계단실에 과압이 생기는 현상과 유사하게 설명될 수 있다.

(2) 계단실 문의 기밀도 변화에 따른 시뮬레이션(Case III-2)

계단실 문의 기밀도를 기밀($0.0087 \text{ m}^2/\text{m}^2$)과 중간($0.013 \text{ m}^2/\text{m}^2$), 느슨($0.018 \text{ m}^2/\text{m}^2$)으로 설정하여 연돌효과의 영향을 평가하였다.

시뮬레이션 결과, Fig. 8에 나타난 것처럼 계단

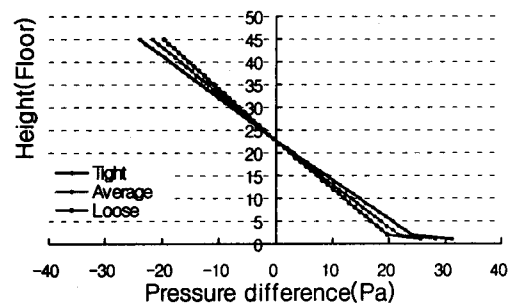


Fig. 8 Pressure differences of staircase door according to air tightness.

실 문에 걸리는 압력차는 기준값 50 Pa보다 적게 나타나서 연돌효과로 인한 문제점은 없는 것으로 나타났다. 압력차의 변화는 엘리베이터 문의 침기량 변화에 따른 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 계단실 문의 기밀도가 높아지면 계단실 문에 더 많은 압력이 작용하는 것으로 나타났다.

3.2.4 공기의 유출부에서의 건축적 요소의 변화에 따른 시뮬레이션(Case IV)

여기서는 공기의 유출부에 대한 영향을 평가하기 위해서 공기유동 경로상 유출부에 해당하는 상층부의 주요 개구부인 옥상층 출입문 개폐의 경우와 엘리베이터 기계실에 자연환기를 위한 개구부가 있는 경우에 대하여 연돌효과의 영향을 평가하는 시뮬레이션을 실시하였다.

(1) 엘리베이터 기계실 개구부에 따른 시뮬레이션(Case IV-1)

공기 유출부에서의 영향을 평가하기 위해 엘리베이터 기계실에 자연환기를 위한 개구부를 둔 경우 엘리베이터 샤프트 상부와 기계실에 개구부를 설치하여 개구부가 없는 경우와 비교하였다.

그 결과, Fig. 9에 나타난 것처럼 개구부가 있는 경우 엘리베이터 문에 걸리는 압력차가 3~4 Pa 증가하여 개구부가 없는 경우 2층까지만 발생하던 엘리베이터 문에서의 압력차 문제가 5층까지 증가하여 문제가 발생하였다. 이는 엘리베이터 상부에 있는 개구부로 공기가 유출되면서 연돌효과를 촉진시켜 엘리베이터 샤프트 하부의 공기유입이 증가되어 발생하는 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 엘리베이터가 운행되면서 상층부의 문이 열렸을 때 발생하는 하층부 엘리베이터 문에서 오동작의 원인을 알 수 있다. 따라

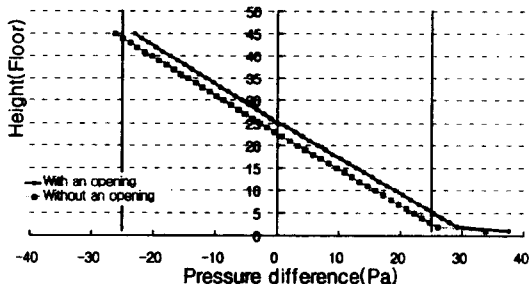


Fig. 9 Pressure differences of elevator door with and without an opening in elevator mechanical room.

서, 엘리베이터 샤프트 상부의 개구부는 연돌효과의 측면에서는 불리하므로 개구부를 두는 자연환기 대신 패키지 에어컨을 이용한 기계실 냉방을 하는 것이 바람직하고, 기계실 바닥과 엘리베이터 샤프트 사이에 뿔려 있는 다른 개구부들도 가능하면 작게 하고 기밀하게 시공하여 상부로의 공기유출을 줄이는 계획이 요구된다.

(2) 옥상층 출입문 개폐에 따른 시뮬레이션(Case IV-2)

옥상층 계단실 문의 개폐에 따른 연돌효과의 영향을 평가하기 위해서 옥상층 문이 열렸을 경우(1Do)와 닫혔을 경우(1Dc), 그리고 옥상층 문에 방풍실을 설치하여 닫은 경우(2Dc)에 대해 시뮬레이션을 하였다.

Fig. 10은 옥상층 문을 열었을 경우와 닫았을 경우의 엘리베이터 문에 걸리는 압력차를 나타내고 있으며, 옥상층 문이 열렸을 경우 상층부에서 압력차가 다소 감소하기는 하지만 전반적으로 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 옥상층

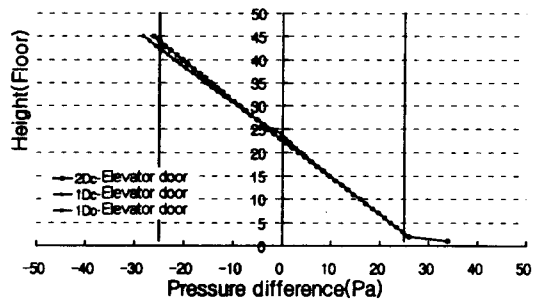


Fig. 10 Pressure differences of elevator door according to opening and closing of rooftop door.

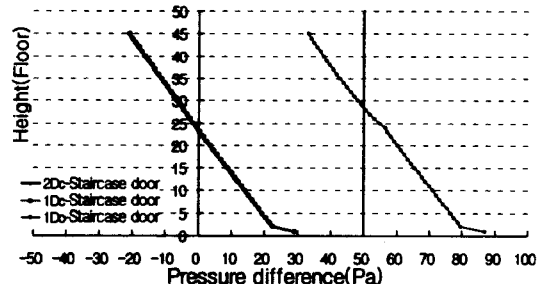


Fig. 11 Pressure differences of staircase door according to opening and closing of rooftop door.

출입문이 계단실과 연결되어 있고 계단실과 엘리베이터 샤프트가 잘 구획되어져 있기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 계단실 문의 경우에는 Fig. 11에 나타난 것처럼 옥상층 문이 열렸을 때에는 각 층에서 압력차가 과도하게 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 모든 계단실에서 공기유동이 실내에서 계단실 쪽으로 향하므로, 이는 비상시 하층부에서 피난경로 방향으로 문을 열기가 어려울 수 있어 심각한 문제를 야기할 수 있다.

3.2.5 기타 시뮬레이션(Case V)

여기서는 1층부 출입문으로부터 엘리베이터 문까지의 문의 개수, 엘리베이터 조닝, 상하층부 개구부 비율이 연돌효과에 미치는 영향을 평가하였으며 모델건물은 중간 기밀도의 외피를 가진 건물로 하였으며, 기타 시뮬레이션 조건은 Case II-1의 경우와 같다.

(1) 1층부 출입문으로부터 엘리베이터 문까지의 문의 개수에 따른 시뮬레이션

공기유입의 주경로가 되는 주출입구로부터 1층 엘리베이터 샤프트까지의 공기유동에 따른 압력차 문제를 해결하기 위해 필요한 구획의 수를 구하기 위하여, Table 5와 같이 구획을 하는 문을 설치하였을 경우에 대하여 각 문의 압력차를 검토하였다.

본 시뮬레이션을 통해서 엘리베이터 전실과 2차 방풍문 추가시 우선순위를 검토하고, 방풍실을 둘 경우 회전문을 앞쪽에 두는 것과 뒤쪽에 두는 것 중 어느 쪽이 연돌효과 방지측면에서 바람직한지에 대하여 검토하였다.

방풍실에 회전문을 설치하는 경우보다는 방풍실을 여닫이문으로 계획하고 주출입문을 회전문

Table 5 Simulation cases (Case V-1)

Case	Vestibule door 1	Main entrance door	Vestibule door 2	Elevator anteroom door
a	×		×	×
b			×	×
c				×
d				
e			×	×
f			×	×

(S+S), (S+R)
 swing door(S), revolving door(R)

Table 6 Pressure difference at each door (Pa, Case V-1)

Case	Vestibule door 1	Main entrance door	Vestibule door 2	Elevator anteroom door	Elevator door
a	·	111	·	·	38
b	54	60	·	·	35
c	36	40	40	·	33
d	23	25	·	95	8
e	75	40	·	·	34
f	36	80	·	·	34

으로 하는 것이 여닫이문에 압력차가 더 작게 나타나므로 Case V-1f의 경우보다는 Case V-1e의 경우가 바람직하다고 판단된다.

시뮬레이션 결과, Table 6을 보면 엘리베이터 전실을 두는 경우를 제외하고는 엘리베이터문의 압력차가 크게 감소하지 않는 것으로 나타나, 방풍실 등의 기타 추가적인 건축적 구획은 효과가 없는 것으로 사료된다.

연돌효과 측면에서 1층부 구획의 방법으로는 엘리베이터 전실문을 두는 것이 가장 유리한 것으로 판단된다. 이는 엘리베이터 전실의 설치가 엘리베이터 문의 압력차를 감소시켜 줄 뿐만 아니라 출입문에서의 압력차도 감소시켜, 출입문을 통한 침기량을 감소시키기 때문이다.

또한, 출입문에 방풍실을 두 개 두는 경우보다는 엘리베이터 전실을 설치하는 것이 엘리베이터 문 및 각 출입문의 압력차를 감소시키는 효과가 큰 것으로 나타났으며, 다소 근소한 차이이지만 방풍실에 회전문을 설치하는 경우보다는 방풍실을 여닫이문으로 계획하고 주출입문을 회전문으로 하는 것이 여닫이문에 압력차가 더 작게 나타나므로 Case V-1f의 경우보다는 Case V-1e의 경우가 바람직하다고 판단된다.

(2) 엘리베이터 조닝에 따른 시뮬레이션

엘리베이터 샤프트의 수직적 조닝에 따른 연돌효과 영향의 영향을 평가하기 위해서 45층 높이의 건물에서 엘리베이터 뱅크를 고층부(오른쪽 뱅크)와 저층부(왼쪽 뱅크)로 구분하여, 조닝이 없는 경우(Case V-2a)와 두 뱅크를 1~23층과 23~45층으로 조닝한 경우(Case V-2b), 저층부는 1~23층까지만 있는 경우(Case V-2c), 그리고 저층부는 1~23층이고 고층부는 1~23층과 23~45층으로 조닝한 경우(Case V-2d)의 네 가지 엘리베이

Table 7 Simulation conditions (Case V-2)

Case		Zoning of elevator shaft				Division of elevator lobby	
		a	b	c	d	e	f
Division of service floor	left bank	1F~45F	1F~23F 23F~45F	1F~23F	1F~23F	Case V-2a elevator zoning, division of two banks	Case V-2c elevator zoning, division of two banks
	right bank	1F~45F	1F~23F 23F~45F	1F~45F	1F~23F 23F~45F		
Concept diagram							

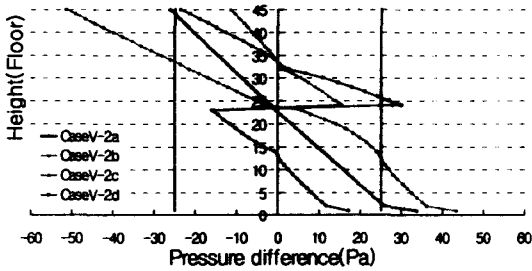


Fig. 12 Pressure differences of elevator door according to zoning of elevator shaft.

터 조닝 방안에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 경우에 대한 설명은 Table 7에 나타나 있으며, 나머지 건물의 조건은 Case II-1의 경우와 같다.

시뮬레이션 결과, Fig. 12에 나타난 것처럼 일반적으로 계획되어지는 Case V-2c와 같은 엘리베이터 조닝을 하였을 경우에는 조닝이 된 저층부의 엘리베이터 뱅크에서는 압력차로 인한 엘리베이터 문의 오동작 문제가 발생하지 않는 것으로

나타났으나, 조닝이 되지 않은 고층부 엘리베이터 뱅크에 있는 엘리베이터 문에서는 압력차가 과도하게 증가하여 나타났다. Case들 중에서 엘리베이터 문에서의 압력차 문제가 발생하지 않는 조닝 계획은 Case V-2b와 Case V-2d의 경우이다.

Fig. 13과 Fig. 14는 각각 Case V-2a와 Case V-2c에서 발생하고 있는 엘리베이터 문의 압력차 문제를 해결하기 위해서 엘리베이터 로비를 서로 구획한 경우와 구획하지 않은 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

그 결과를 보면, Case V-2c의 고층부 엘리베이터 뱅크에 있는 엘리베이터 문에서의 압력차 문제가 상층부 5개층에서만 문제의 가능성을 보이고 있고, 대부분의 층에서는 문제가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

(3) 상하층부 개구부 비율에 따른 시뮬레이션(Case V-3)

여기서는 최하층과 최상층에 각각 큰 개구부가 있을 경우 건물에서 압력분포가 어떻게 변화하는지를 평가하고 이에 따른 문제점을 검토하는 시

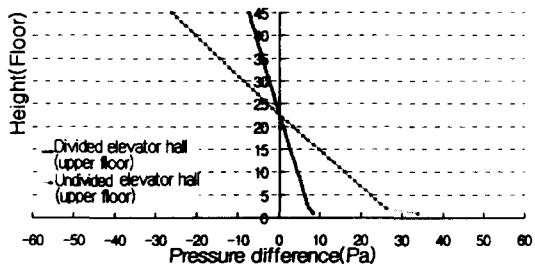


Fig. 13 Pressure differences of elevator door (Case V-2e).

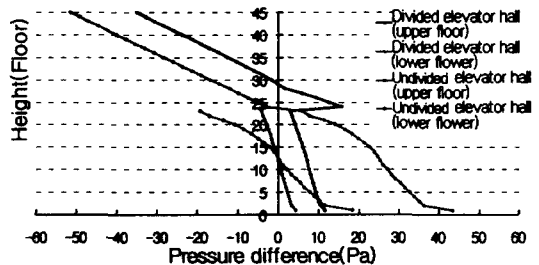


Fig. 14 Pressure differences of elevator door (Case V-2f).

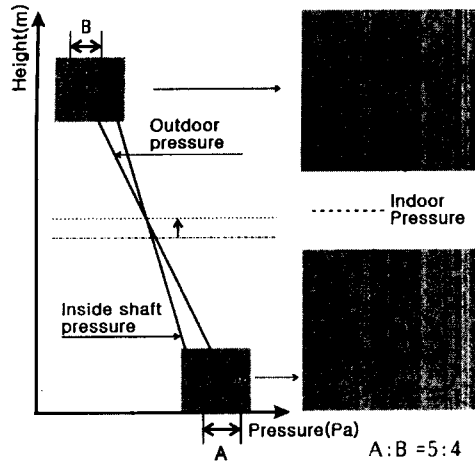


Fig. 15 Pressure distribution with large opening on the first floor (Case V-3a).

물레이션을 실시하였다.

1) 최상층에 큰 개구부가 있는 경우(Case V-3a)

Fig. 15에 나타난 것처럼 큰 개구부가 있는 곳에서는 실내 압력분포선이 외부의 압력분포에 가까워지며 그 결과 실내와 수직 샤프트의 압력차는 크게 증가하여 엘리베이터 문의 오동작과 계단실 문 개폐의 어려움이 따를 것으로 판단된다. 큰 개구부가 있는 곳의 반대편에서는 실내 압력분포선이 샤프트와 가까워지므로 외벽에 큰 압력차가 걸리게 된다.

2) 최하층(1층)에 큰 개구부가 있는 경우(Case V-3b)

1층에 큰 개구부가 있는 경우, 옥상층 문이나 상부층 창문 등에 닫기 어려울 정도의 압력이 작용하게 되는 것을 볼 수 있다. 또한 최하층에서는 엘리베이터 문에 과도한 압력차가 작용하여 오동작의 원인이 된다(Fig. 16 참조).

시뮬레이션 결과, 상하층부를 모두 기밀하게 하는 방안이 중요하지만, 일반적인 건물의 경우 하층부 쪽에 더 많은 개구부가 존재하므로 하층부의 기밀화를 통하여 중성대의 위치를 건물의 중간 높이에 오도록 하는 것이 상층부의 압력차를 줄여 주어서 문제발생 정도를 더 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 네트워크 모델 시뮬레이션을 통

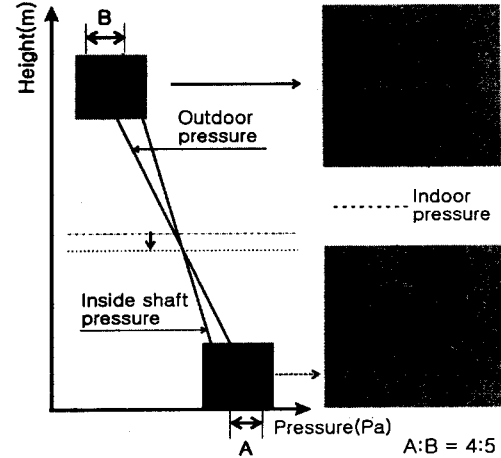


Fig. 16 Pressure distribution with large opening on the first floor (Case V-3b).

해 국내에서 일반적으로 설계되는 중심코어형 오피스 건물에서 연돌효과의 영향을 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 밀실한(tight) 외피를 가진 건물은 엘리베이터 문에서의 문제가 50층(약 230 m) 이상의 높이에서 발생하였고, 계단실 문의 문제는 발생하지 않았다. 중간(average) 기밀도를 가진 건물의 경우 엘리베이터 문 문제가 23층(약 100 m) 이상, 계단실 문의 문제는 39층(약 180 m) 이상의 건물 높이에서 발생하였다.

(2) 출입구에 방풍실을 설치하거나 엘리베이터에 전실을 설치한 경우, 일반 오피스 건물에서 건물 높이 28층(약 120 m)까지 연돌효과로 인한 문제들을 해결할 수 있다.

(3) 엘리베이터 문의 기밀도가 낮을수록 엘리베이터 문의 압력차는 감소하는 것으로 나타났다. 중간 기밀도를 가진 45층(약 200 m) 높이의 건물에서 엘리베이터 문의 침기량이 적은 경우(tight), 8층(약 40 m) 이하와 38층(약 170 m) 이상의 엘리베이터 문에서 문제발생 가능성을 보이고 있다.

(4) 엘리베이터 샤프트 상부의 개구부는 연돌효과의 측면에서는 불리하므로 개구부를 설치하지 않는 것이 유리하고, 옥상층 문의 경우 열렸을 때에는 각 층에서 압력차가 과도하게 증가하는 것으로 나타났다.

(5) 1층부 구획의 방법으로는 엘리베이터 전실 문 두고 적절히 조닝함으로써 연돌효과 영향을 줄일 수 있다.

후 기

본 연구는 서울대 공학연구소 및 두뇌한국21사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Korea Facility Management Association, 2000, Final Report of Impact Analysis on Stack Effect in Suwon Hwasung Tower.
2. Tamura, G. T. and Wilson, A. G., 1967, Pressure Differences Caused by Chimney Effect in Three High Buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 73, Part 2.
3. ASHRAE, 1993, Field Verification and Simulation of Problems Caused by Stack Effect in Tall Buildings, ASHRAE Research Project 661, p. 33.
4. Lovatt, John E., 1994, Stack Effect in Tall Buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 100, Part 2.
5. Tamblyn, R. T., 1991, Coping with Air Pressure Problems in Tall Buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 97, Part 1, p. 826.
6. Tamblyn, R. T., 1993, HVAC System Effects for Tall Buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 99, Part 2.
7. Walton, G. N., 2000, CONTAMW-User Manual, NISTIR 6476, National Institute of Standards and Technology.
8. Korea Facility Management Association, 2001, Development of Architectural Design Guideline against the Stack Effect in High-rise Buildings.
9. ASHRAE, 1997, ASHRAE Handbook Fundamentals, ASHRAE, Atlanta, GA, p. 25.19.
10. Tamura, G. T., 1994, Smoke Movement and