

초고층 복합건축물 엘리베이터에서의 연돌현상 저감방안 평가

유정연[†], 송규동, 조동우^{*}

한양대학교 건축공학과, 한국건설기술연구원 건축도시환경연구실^{*}

Evaluation of the Alternatives to Minimize Stack Effect Problems with Elevators in Tall Complex Buildings

Jung-Yeon Yu[†], Kyoo-Dong Song, Dong-Woo Cho^{*}

Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

^{}Division of Building and Urban Environment Research, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea*

(Received June 30, 2008; revision received January 22, 2009)

ABSTRACT: The purpose of this study is to evaluate the stack effect reduction alternatives in tall complex buildings in cold climates. The main problems in tall buildings occur in elevators. Such problems as elevator doors that do not close and exhaust airflows result in excessive pressure differences across elevator doors due to stack effect. Under the expected conditions causing these pressure differences, Field measurements are performed in three tall buildings. Each result of the measurements is analyzed in architectural design aspects. With these analysis, building design guidelines are proposed and analyzed by field measurements and computer simulations.

Key words: Tall complex Buildings(초고층 복합건축물), Stack Effect(연돌 효과), Building design guidelines(건축물 설계지침), Field Measurements(현장 실측)

1. 서 론

도심 오피스 건축물의 초고층화와 더불어 최근 국내 아파트의 건설동향 또한 초고층의 타워형 주상복합 건축물을 선호하는 경향을 보이고 있다. 그러나 초고층 주상복합 건축물 및 오피스 건축물의 경우 지하층이나 저층부에 대규모의 상업공간과 지하주차장이 위치하게 되고 이곳을 통한 유동인구로 인해 유입기류가 크게 증가하기 때문에 이러한 건물형태는 실외 온도가 매우 낮

아지는 겨울철 연돌효과에는 매우 취약한 건물형태라 할 수 있다. 또한 국내의 초고층 주상복합 건축물의 경우 1층 및 지하층에 기본적으로 설치되어야 하는 회전문이 설치되어 있지 않은 경우가 많은데, 이는 거주자들의 비 선호와 사고에 대한 위험요소가 가장 큰 이유이다.

본 연구에서는 국내의 초고층 주상복합 건축물 및 오피스 건축물 3곳을 대상으로 겨울철 발생하는 연돌현상에 대하여 현장실측을 통한 문제점 분석 및 도출된 연돌현상 저감방안에 대한 평가를 수행하였다. 연돌효과에 크게 영향을 미치는 상황에 대한 조건별 실험이 수행되었으며, 이를 통해 도출된 연돌현상 저감 방안은 현장 측정과 시뮬레이션을 통해 평가되었다.

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0326; fax: +82-31-910-0361

E-mail address: jyyu@kict.re.kr

2. 연구의 내용 및 방법

초고층 건축물에서는 동계 실내외 온도차로 인해 유발되는 연돌효과로 다양한 문제점들이 발생하게 되며 연돌효과에 기인한 압력차는 건물의 외피(1층 주출입문, 내벽(사무실 및 세대 현관문), 그리고 수직샤프트의 벽(엘리베이터 문)에 분포하게 된다.⁽¹⁾ 이러한 압력차로 인한 연돌현상 중 심각하게 대두되는 것은 주로 현관층 엘리베이터 문의 오작동(엘리베이터 문이 문 프레임에 달라붙어 문이 닫히지 않는 현상)과 틈새바람으로 인한 불쾌소음발생, 그리고 과도한 침기로 인한 난방부하 증가가 그것이다. 이러한 연돌현상을 해결하게 위해 국외 관련 연구에서 제안되는 방안은 다음과 같다. 먼저, Donald⁽²⁾는 외피의 기밀성 확보를 가장 강조하였으며 주 출입문에는 반드시 회전문을 설치하고, 만약 방풍실을 적용할 경우에도 반드시 한쪽문은 닫힌 상태를 유지하는 방법과 엘리베이터 로비에 추가로 전실문을 설치하여 엘리베이터 문의 압력차를 분담시키는 방법을 제안하고 있다. 공조관련 방안으로는 100% 외기를 이용한 주출입층의 로비 가압 방법과 건물 전체에 대하여 누기 및 배기의 합보다 외기도입 비율이 최소 5% 이상이 되도록 공조시스템을 운영할 것을 제안하고 있었다. Tamblyn⁽³⁾ 또한 외피의 기밀성을 강조하였으며 건물 외피 패널은 75 Pa의 압력하에서 1.09 cmh/m² 이상의 누기가 발생하면 안된다고 규정하고 있다. 또한, 공조시스템을 이용하여 건물 전체의 압력분포를 조절하여 엘리베이터 문의 오작동 및 소음 문제를 해결하는 방안을 제안하고 있으나 국내에는 아직까지 연돌현상에 대한 인식 부족 및 위와 같은 적극적인

인 연돌현상 저감방안에 대한 관련 연구 및 적용 사례가 미흡하여 심각한 연돌현상을 겪고 있다.

따라서 본 연구에서는 초고층 건축물 동계 연돌현상 현장평가 및 조건별 실험, 시뮬레이션을 통해 초고층 건축물의 연돌효과 가중요인을 분석하고 이를 통해 연돌현상 저감방안을 제안하였다. 제안된 방안은 현장실험 및 시뮬레이션을 통해 평가되었다.

3. 연돌현상 평가 현장 실험

3.1 실험 방법 및 조건

초고층 건축물에서의 연돌현상 평가를 위한 주 실험으로 연돌효과에 크게 영향을 미치는 저층부 주요 출입문의 개방 조건별로 각 건축물의 고층용 엘리베이터 문, 비상용 계단실 문 및 현관층 주 출입문의 압력차를 측정하였으며 건물 전체의 압력과 온도분포를 파악하기 위하여 절대 압력 및 실내·외 공기온도를 측정하였다. 먼저 모든 출입문이 다 닫혀 있는 경우를 기본 조건(Base case)으로 설정하고 엘리베이터 문의 압력차에 가장 큰 영향을 미치는 현관층 주 출입문을 개방한 경우(Case A, Fig. 1의 A), 지하 1층 주 출입문(외부연결 아케이드 및 주차장)을 개방한 경우(Case B, Fig. 1의 B), 이사용 출입 경로를 개방한 경우(Case C, Fig. 1의 C), 현관층과 지하층과의 연결 통로를 개방한 경우(Case D, Fig. 1의 D)의 5가지 조건에 따른 연돌효과의 영향을 비교 실험하였다. 측정시 온도 조건은 A 주상복합 건물의 경우 외기 -10℃, 실내 22℃, B 주상복합 건물의 경우 외기 0℃, 실내 22℃, C 오피스 건물의 경우



Fig. 1 Plan 1F of the measured building B.

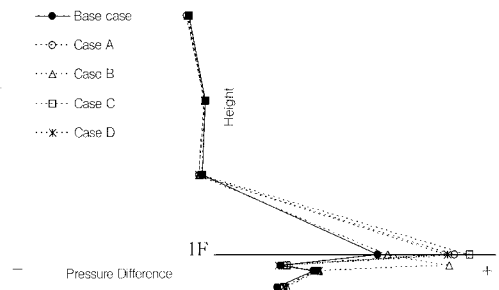


Fig. 2 Pressure differences across elevator doors.

외기 0℃, 실내 24℃이었으며 측정 당시 외부의 풍속은 전 조건에서 0.5 m/s 미만이었다.

3.2 각 조건 별 실험결과

초고층 건축물의 저층부 주 출입문 개방 조건에 따른 실험결과는 Fig. 2와 같다. 모든 경우에 대하여 모든 문이 다 닫혀있는 경우(Base case)에서 엘리베이터 문의 압력차가 가장 작게 나타났다. 건물의 주출입문에 회전문이 설치된 경우도 이에 해당하며 기밀한 회전문은 항상 문이 닫혀있는 조건을 유지할 수 있기 때문에 가장 효과적인 문의 형태이다. 가장 문제가 심각한 1층 엘리베이터 문의 경우 이사용 출입문이 개방된 경우(Case C)가 가장 압력차를 크게 증가시켰으며 이는 이사하는 동안 개방되는 개구부의 크기가 크고 개방 시간이 길기 때문에 가장 많은 외기가 유입되었기 때문이다. 다음으로는 현관층 주 출입문이 개방된 경우(Case A)와 지하층과의 연결통로가 개방된 경우(Case D) 모두 현관층 엘리베이터 문의 압력차가 크게 증가하고 지하층에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났는데 이는 주 출입문과 지하층 연결통로가 모두 기류 흐름의 방향상 직접적으로 현관층 엘리베이터 문의 압력차에 영향을 미치는 유동경로이기 때문이다.

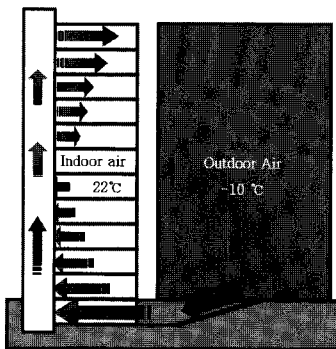
측정이 이루어진 3곳 모두 지하층이 개방된 공용공간으로 식당가와 대형 쇼핑몰 등이 자리 잡고 있어 유동인구가 많을 뿐만 아니라 실내 공조 온도 또한 높아 지하로부터 많은 기류가 상승하였다. 마지막으로 지하층 주 출입문(외부 아케이

드 및 주차장 출입문)이 개방된 경우(Case D)였는데, 지하층의 주 출입문을 개방한 경우는 해당 지하 1층의 엘리베이터 문에만 크게 영향을 주고 현관층을 비롯한 다른 엘리베이터 문에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 이는 각 층의 엘리베이터 문의 압력차를 조절하기 위해서 해당 층의 출입문 및 외피의 기밀성을 제어하는 것이 가장 효과적이라는 것을 나타낸다.

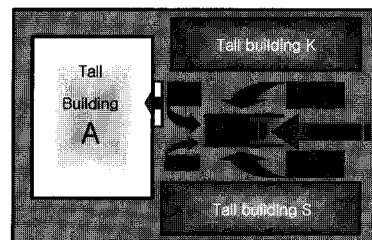
국외 관련연구⁽⁴⁾에서는 몇몇 사례에서 엘리베이터 문이 25 Pa의 작은 압력차에서도 오작동을 일으켰다고 한다. 국내 초고층 건축물에서의 실험결과 엘리베이터 문에서 오작동(문이 닫히지 않음)이 발생하는 압력차는 다양하게 나타났는데 이는 엘리베이터 문의 자체 무게와 문이 닫히는 힘이 차이가 났기 때문이다. 엘리베이터 문이 가볍고 닫히는 힘이 약한 A와 B 건축물의 경우 엘리베이터 문에 약 70~80 Pa 정도의 압력차가 발생할 경우 문이 닫히지 않았고 엘리베이터 문이 무겁고 닫히는 힘을 강하게 조절해 놓은 C 건축물의 경우 압력차가 100 Pa 이상 될때 문이 닫히지 않았다. 이를 통해 볼 때, 초고층 건축물의 엘리베이터 문은 자체 무게가 무겁고 닫히는 힘의 조절이 용이한 시스템을 적용하는 것이 연돌효과로 인한 오작동에 대응하는데 유리할 것으로 판단된다.

3.3 각 건축물 별 현장평가 결과

측정된 3곳의 실험 결과는 위에서의 4가지 조건에 대하여 유사한 결과를 나타내었으나, 각 건



(a) Air flow pattern caused by stack action



(b) Air flow pattern caused by wind action

Fig. 3 Air flow pattern for the tall building A.

축물의 건축적, 설비적 특성에 따라 각각의 연돌 현상을 나타내고 있었다.

3.3.1 초고층 주상복합 건축물 A

먼저 초고층 주상복합 건축물인 A 건축물은 Fig. 3과 같이 겨울철 바람이 많이 부는 곳에 건물이 위치하며 지하 주차장으로 연결된 램프가 2개의 거대한 초고층 주상복합 건축물 사이에 위치하여 그 곳으로 바람길이 형성되고 있었다.

겨울철 강풍이 불 경우, 주변 건물과 자체 건물의 형상으로 인해 지하 주차장 램프로 과도한 외기가 유입되어 지하 주차장 출입램프에 근접해 있는 지하 1층의 엘리베이터 문이 닫히지 않는 문제가 발생하였다. 또한 차가운 외기의 과도한 유입으로 인해 지하 주차장내 배관이 동파되는 상황도 발생하였다. A 건축물의 경우 해당 지하 주차장 램프가 일반적인 나선형이 아니고 직선형이기 때문에 유입되는 바람의 압력(속도)이 줄지 않은 상태로 지하 1층 출입문으로 유입되어 엘리베이터 문의 압력차를 증가시키는 것으로 사료된다. 따라서 초고층 건축물의 경우 겨울철 현관층 주 출입문 및 지하 주차장으로의 과도한 외기 유입을 막기 위해 해당 지역의 바람분포와 자체 건물의 형상, 주 출입문, 지하 주차장 램프의 위치 및 형상에 대한 사전 고려가 설계 시점에서부터 이루어져야 하겠으며 이를 통해 주 출입문 및 지하 주차장으로의 바람으로 인한 외기 유입을 줄이기 위해 방법으로는 방풍림 및 나선형 램프의 적용, 바람길과 구획된 주 출입문의 배치, 지하 1층 주출입문에 회전문 적용 등의 방안이 제안되

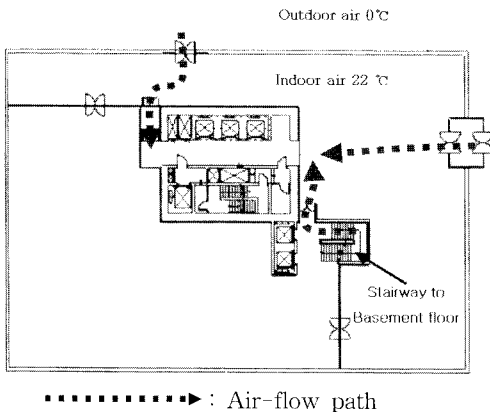


Fig. 4 Ground floor plan of the tall building B.

었다.

3.2.2 초고층 주상복합 건축물 B

다음은 초고층 주상복합 건축물인 B 건축물의 경우이다. Fig. 4에서와 같이 B 건축물은 지하 쇼핑물과 현관층이 오픈된 계단으로 연결되어 지하층으로부터 상승하는 기류가 현관층 엘리베이터 문의 압력차 증가에 큰 부분을 차지하였다. 또한 이 건축물의 경우 거주자의 비선호로 인해 지하층 및 현관층 주 출입문에 회전문이 설치되어 있지 않아 평상시에도 주 출입문으로부터 유입되는 외기의 유동량이 큰 것으로 나타났다. 실측 결과 분석 후, 이 건물에서는 현관층에서 지하층과 연결된 통로에 추가로 문을 설치하여 지하층으로부터 유입되는 기류를 차단하였다.

3.3.3 초고층 오피스 건축물 C

마지막으로 초고층 오피스 건물인 C 건축물의 경우이다. Fig. 5에서와 같이 이 건물은 초고층 건축물인 본관과 공용공간으로 이루어진 별관(지하 5층, 지상 3층 규모)이 연결되어 있으며 그 연결통로가 되는 지하층과 지상 1층, 지상 2층의 엘리베이터 문에서 심각한 문제가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 지하 1층은 주 출입구가 외부로 바로 연결되어있고 개방된 대형 식당가 및 쇼핑몰이 자리 잡고 있어 지하 1층에서 유입되는 외기로 인한 문제가 가장 심각하였다. 이를 해결하기 위해 C 건축물에서는 고층부 건물의 현관층 로비와 별관 로비 사이에 회전문을 설치하였

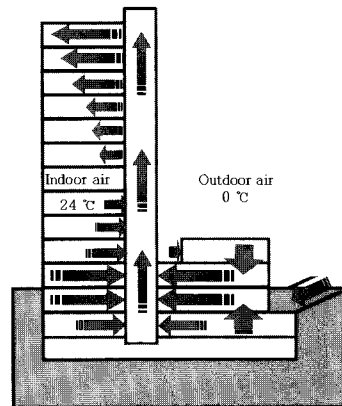


Fig. 5 Air flow pattern for the tall building C.

으며 엘리베이터 샤프트에서 현관층 로비와 최상층 엘리베이터 기계실로 연결된 별도의 관통부를 설치하여 현관층 및 최상층 엘리베이터 문에 걸리는 압력차를 저감시키는 방안을 적용하고 있었다. 또한 겨울철에는 고층용 엘리베이터 문의 닫히는 힘을 강하게 조절하여 압력차로 인해 문이 닫히지 않는 문제의 발생을 줄이고 있었다.

4. 연돌효과 저감방안 제안

총 3곳의 초고층 주상복합 및 오피스 건축물의 동계 연돌현상에 대한 실험결과와 기존연구⁽⁵⁻⁶⁾ 결과를 통하여 다음과 같은 연돌현상 저감방안이 제안되었다. 제안된 연돌현상 저감방안은 현장 실험 및 ContamW 프로그램을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평가·분석되었다.

4.1 엘리베이터 샤프트 관통부 설치

Fig. 6은 동절기 고층건물에 대하여 실외, 실내, 엘리베이터 샤프트 내부의 압력 분포를 나타낸 것이다. 건물외부의 대기압인 실외 압력분포($P_{outside}$)를 보면 외부 공기의 기온이 매우 낮기 때문에 높이에 따라 압력이 크게 낮아지는 것을 볼 수 있다. 그 반면, 공기 온도가 더 높은 실내 압력분포(P_{inside})는 그 기밀기가 더 완만하여, 엘리베이터 샤프트 내의 압력분포(P_{shaft})는 높이에 따른 차이가 거의 없게 된다.

Fig. 6의 (a)의 경우가 일반적인 고층건물에서의 압력분포를 나타내는 데 여기에서 실내 압력과 샤프트 내부 압력의 차이는 엘리베이터 문에

걸리는 압력차이며, 실외 압력과 실내 압력의 차이는 외피에 걸리는 압력차이다. 이 경우, 실외의 압력 분포는 일정하기 때문에 외피의 기밀성이나 엘리베이터 문의 기밀성에 따라 실내와 샤프트 내부의 압력분포가 변화(압력분포선의 기울기가 변화)하면서 외피에 걸리는 압력차와 엘리베이터 문에 걸리는 압력차가 변화하게 되는 것이다.

Fig. 6의 (b)는 엘리베이터 샤프트의 전층에 걸쳐 관통부를 설치하여 샤프트 벽체의 기밀도를 낮추어 샤프트 내부의 압력분포를 실내 압력분포에 가깝도록 이동시킨 경우이다. 이 경우 실내와 샤프트 내부의 압력차이인 엘리베이터 문에 걸리는 압력차가 크게 줄어 든 것을 볼 수 있다. 그러나 동시에 외피에 걸리는 압력차는 증가하여 침기가 증가하게 되므로 이에 대응하여 출입문의 기밀성 확보 및 회전문의 적용, 외피의 기밀성 강화가 요구된다.

다음은 샤프트 관통부 크기 및 설치 위치에 따른 압력분포를 평가하였다. Fig. 7은 기존의 기밀한 엘리베이터 샤프트를 기준 조건(Base case)로 하고 현관층인 1층과 최상층 기계실에서 엘리베이터 샤프트에 관통부를 설치한 경우(Case A), 현관층과 최상층에 엘리베이터 문과 인접한 작은 샤프트 관통부를 설치한 경우(Case B), 현관층에만 관통부가 설치된 경우(Case C), 최상층에만 관통부가 설치된 경우(Case D)에 대하여 동계 고층용 엘리베이터 문에 걸리는 연돌효과에 의한 압력차 분포를 나타낸 것이며 본 결과는 ContamW 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 통해 도출되었다. 이러한 결과를 바탕으로 60여층의 초고층 사무용 건축물에서 해당 조건에 대한 현장 실험을

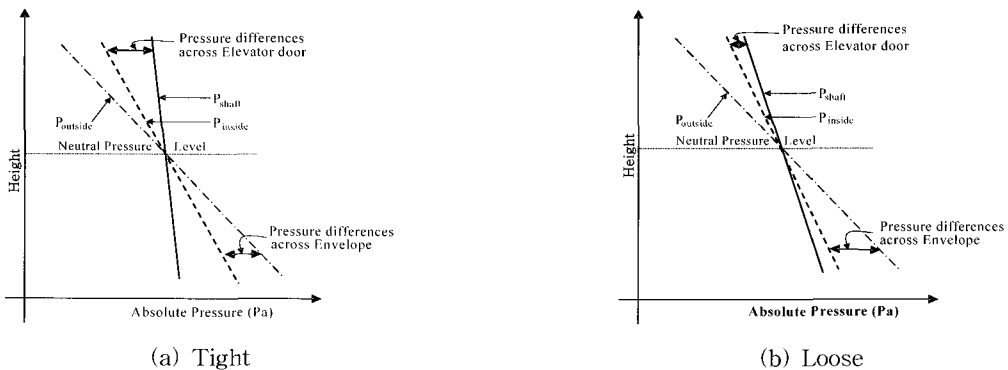


Fig. 6 Absolute pressure distributions according to air-tightness of elevator shaft wall.

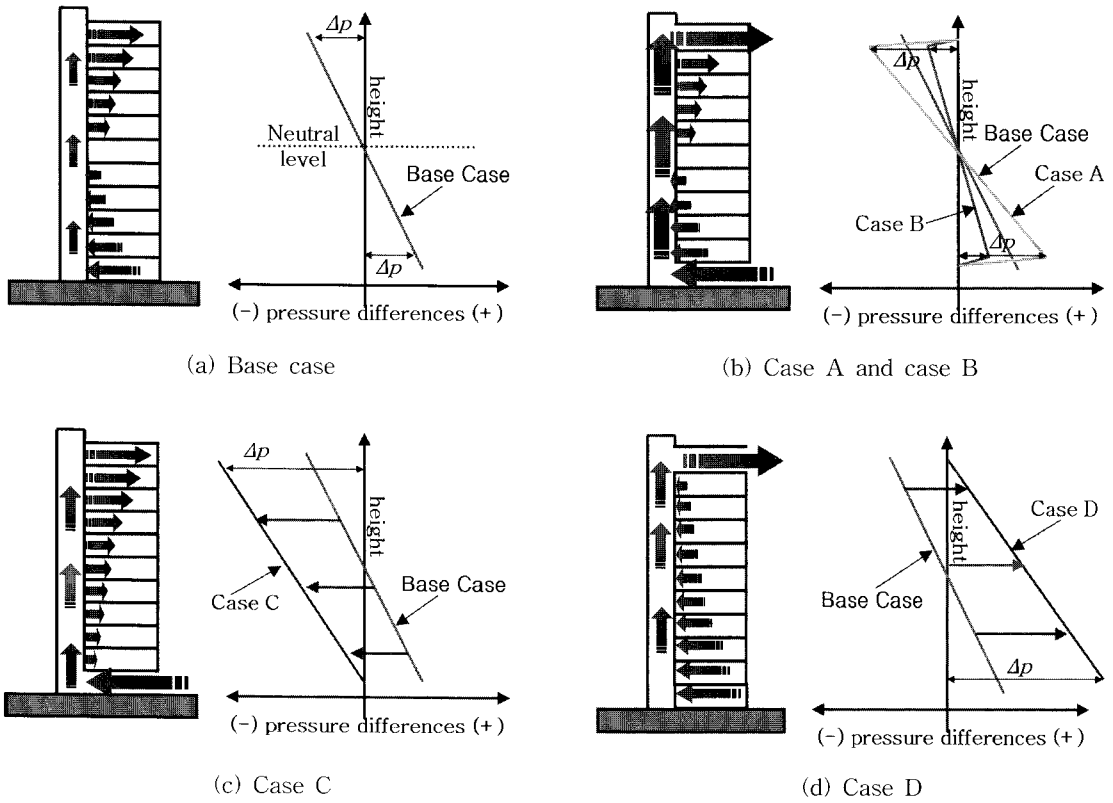


Fig. 7 Absolute pressure distributions according to elevator shaft openings.

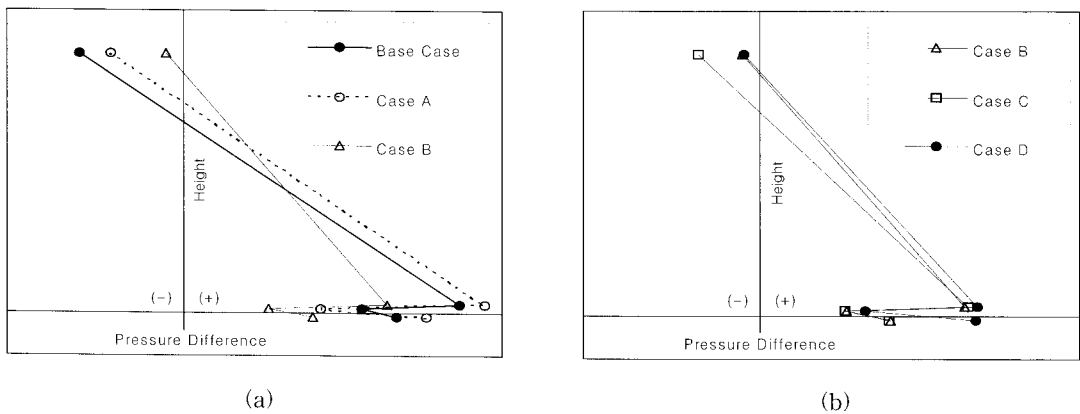


Fig. 8 Pressure differences across elevator shaft with and without openings.

수행하였으며 그 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 8의 (a)에서와 같이 샤프트 관통부의 크기가 큰 경우에는 관통부가 있는 1층과 최상층에서는 압력차가 줄어들지만 나머지 층에서는 오히려 압력차가 증가되었다. 그러나 관통부 크기가 작은 경우에

는 전체적으로 압력차가 모두 줄어든 것으로 나타났다. 그러므로 건물의 상황에 따라 관통부의 크기가 적절히 조율이 되어야 샤프트 관통부 설치에 엘리베이터 문의 압력차를 낮추는 데 그 역할을 할 수 있는 것으로 평가되었다. 또한 Fig. 8의

(b)에서와 같이 고층부에 설치된 관통부는 고층부 엘리베이터 문의 압력차는 저감시키지만, 저층부 엘리베이터 문의 압력차는 다소 상승시키게 되며 저층부에 설치된 관통부는 이와 반대로 작용하게 된다. 따라서 샤프트의 관통부는 저층부 및 고층부에 동시에 설치(Case B)되어야 하며 개구부의 크기 제어가 가능하여야 한다.

본 엘리베이터 샤프트 관통부는 관통부가 엘리베이터 홀이나 사무공간에 영향을 주는 동일 층의 공간에 위치하는 경우에는 관통부로의 과도한 공기 유입이나 유출로 인한 인접 사무실 출입문에 압력차가 상승하게 되는 경우가 발생하게 되므로 공조를 병행하여 이를 조절할 필요성이 있다. 또한 본 엘리베이터 샤프트 관통부는 방화구획상의 개구부이므로 자동방화장치로서 작동하도록 시스템이 구성되어 있다.

4.2 엘리베이터 샤프트 내 공기 냉각

연돌효과의 주 요인이 되는 엘리베이터 샤프트 내 공기온도를 낮추어 연돌현상을 저감시키고자 한다. 본 저감방안은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 평가되었으며 결과는 Fig. 9와 같다. 시뮬레이션은 초고층 오피스 건축물 C를 대상으로 외기 온도 -11.2℃의 상태에서 외기의 유입이 가장 큰 지상 1층 로비의 온도를 15℃로 설정하고, 각층의 엘리베이터 홀의 온도를 18℃로 설정하여 전체 엘리베이터 샤프트 내의 공기 온도를 떨어뜨린 경우(이 때, 엘리베이터 샤프트 온도는 약 18℃로 가정)와 일반적인 오피스 건물(실내 온도 22℃, 샤프트 온도 22℃)의 경우를 기본 조건

(Base case)으로 비교하였다. 시뮬레이션 결과 본 조건에서 샤프트 내부의 공기를 냉각시킨 경우가 약 26% 정도의 압력차 저감 효과를 나타내었다.

4.3 1층 고층부 엘리베이터 홀에 전실문 설치

일반적으로 고층건물의 1층 로비는 겨울철 연돌효과로 인해 주출입문에 거대한 압력이 걸리게 되는 데 이 압력은 출입문이 열릴 때마다 그대로 엘리베이터나 비상용 계단실의 문으로 이동하여 엘리베이터 문의 압력차를 가중시킨다. 그러나 로비에 엘리베이터 전실을 설치하거나 코어와 외피 사이를 구획하여 압력차를 분산시키게 되면 엘리베이터 문에 집중되는 압력을 줄일 수 있게 된다. 본 저감방안에 대하여 초고층 주상복합 건축물 B를 대상으로 외기온도 -5℃, 실내온도 22℃인 조건에서 현장실측 결과, 1층 로비에 전실이 설치된 경우가 그렇지 않은 경우에 대하여 Fig. 10과 같이 약 30% 정도의 압력차 저감을 보였다.

5. 결 론

국내의 초고층 주상복합 건축물 2곳과 초고층 오피스 건축물 1곳에서의 동계 연돌현상에 대한 실측을 통한 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 저층부의 주 출입구의 기밀성을 확보하기 위해 회전문 및 엘리베이터 홀에 전실문을 설치하는 것이 엘리베이터 문의 압력차를 저감시키는데 가장 효과적이었다. 그러나 거주자의 비선호와 인식 부족으로 인하여 설치가 꺼려지는 경향을 보이고 있어 주 출입문을 통한 외기 유입이

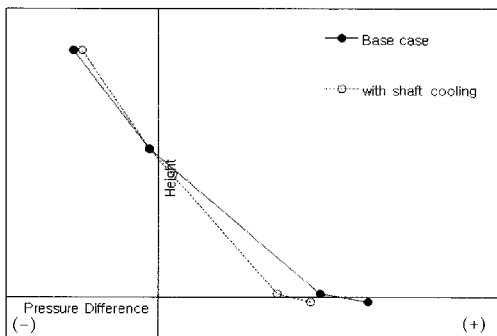


Fig. 9 Pressure differences across elevator door with and without shaft cooling.

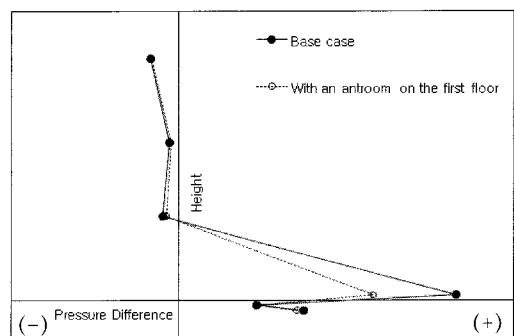


Fig. 10 Pressure differences across elevator door with and without antroom.

심각하였다.

(2) 주상복합의 형태로 구성된 초고층 건축물은 저층부에 유동인구가 많은 대규모의 공용공간으로 인하여 저층부의 유입풍량을 가중시키게 되므로 저층의 공용공간과 고층부의 출입구역은 확실히 구획이 되어야 한다.

(3) 엘리베이터 문의 과도한 압력차로 인한 오동작을 막기 위해 엘리베이터 샤프트에 관통부를 설치하여 엘리베이터 문에 걸리는 압력차를 저감시키는 방법은 관통부의 크기가 적당히 제어될 경우 저감효과가 우수한 것으로 나타났다.

(4) 엘리베이터 샤프트 내부의 공기온도를 낮추어 연돌효과를 낮추는 방법 또한 시뮬레이션과 사례실측을 통하여 효과가 있는 것으로 평가되었다.

본 연구는 초고층 건물에서 연돌현상을 저감하기 위한 방안 중 주로 건축적인 방안들에 대한 평가로 이루어졌다. 그러나 초고층 오피스 건물의 경우 공조운영을 통한 압력분포가 건물 내 연돌효과로 인한 압력분포에 큰 영향을 미치고 있어 현재 공조운영이 연돌현상에 미치는 영향에 대한 현장평가가 진행중이며 향후 초고층 건물의 연돌현상 저감을 위한 공조운영 방안이 제안될 예정이다.

후 기

본 연구(03산 C04-01)는 건설교통부와 한국건설교통기술평가원의 재정적인 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Tamura, G. T., 1994, Smoke Movement and control in High-rise Buildings, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts.
2. Donald E. Ross, 2004, HVAC design guide for tall commercial buildings, ASHRAE.
3. Tamblyn, R. T., 1993, HVAC system Effects for Tall Buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 99, Part 2.
4. Tamblyn, R. T., 1991, Copying with Air Pressure Problems in Tall Buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 97, Part 1, p. 826.
5. Yu, J. Y., 2004, Evaluation of Stack Effect according to the Shape and the Window Area Ratios of Lobby in High-rise Buildings, Proceedings of CTBUH 2004 Conference.
6. Yu, J. Y., 2008, The design procedure for reducing stack effect problems in the tall complex building, proceedings of Indoor Air 2008.