

초고층 건축물의 화재발생시 연돌효과와 연기확산 차단방안

초고층 건물에서 등계 화재발생시 연돌효과로 인해 가중되는 연기의 확산을 차단하기 위한 대응방안 모색

유 정 연

한국건설기술연구원 (jyyu@kict.re.kr)

연구 내용

본 연구에서는 초고층 건축물에서 화재 발생 시 연돌효과로 인한 연기의 확산 경로가 되고 있는 엘리베이터 샤프트 및 피난계단에 대하여 관련 연구가 활발하게 진행되었던 캐나다의 초고층건축물 관련 법규 및 방재기준에 대한 문헌조사를 수행하였다. 이를 통해 도출된 연기확산 차단방안에 대하여 시뮬레이션을 통해 본 방안의 적합성을 평가하여 최종적으로, 초고층 건축물에서 연돌효과로 인해 가중되는 연기의 확산을 막기 위한 관련 방재설계방안을 제안하였다.

초고층 건축물에서 연돌효과와 연기의 확산

건물의 내부와 외부의 압력이 같아지는 높이를 중성대(NPL: Neutral Pressure Level)라 하며 이 지점 위에서는 내부의 압력은 외부보다 크고, 아래에서는 내부의 압력보다 더 큰 외부의 압력이 작용하게 되어 외기의 침기를 유발한다. 높이 H에서의 연돌효과로 인한 압력차는 다음과 같다.¹⁾

$$\Delta P_s = (\rho_o - \rho_i)g(H - H_{NPL}) = \rho_i g(H - H_{NPL})(T_i - T_o)/T_o$$

단, ΔP_s = 연돌효과로 인한 압력차, Pa

ρ = 공기 밀도, kg/m^3 (실내에서 약 1.2)

g = 중력가속도, $9.81 m/s^2$

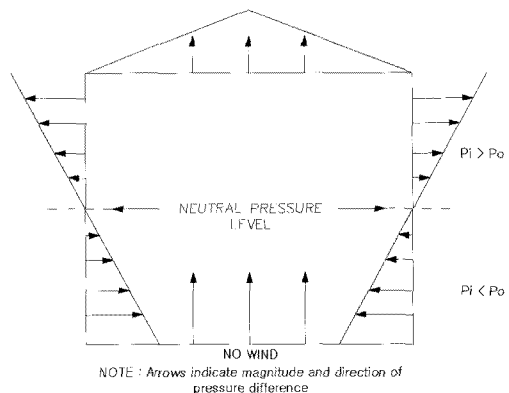
H = 측정 위치, m

H_{NPL} = 중성대의 높이, m

T = 평균 절대 온도, K

i = indoor o = outdoor

실내와 실외의 기온차는 침기를 발생시키는 밀도차와 그로인한 압력차를 유발한다. 난방을 하는 계



[그림 1] 난방시 일반 건물에서의 연돌효과로 인한 압력차¹⁾

1) ASHRAE, ASHRAE HANDBOOK - FUNDAMENTALS, Atlanta GA, 1997

절에는 내부의 따뜻해진 공기가 상승하여 건물의 최상부 근처에서 빠져나가고 건물의 최하층 부근으로 들어오는 차가운 외부 공기로 대체된다. 냉방을 하는 계절에는 공기가 이동하는 방향이 반대로 바뀌게 되고, 실내의 온도 차가 작아지게 때문에 침기 비율은 전반적으로 낮아지게 된다. 일반적으로 난방을 하는 계절에는 연돌 효과로 인한 건물에서의 압력 분포가 그림 1과 같은 형태를 보인다. 일반적으로 엘리베이터 샤프트 등 수직샤프트를 갖는 고층건물의 경우 그림 2, 1층에 커다란 개구부를 갖는 경우에는 그림 3과 같은 형태를 나타낸다.

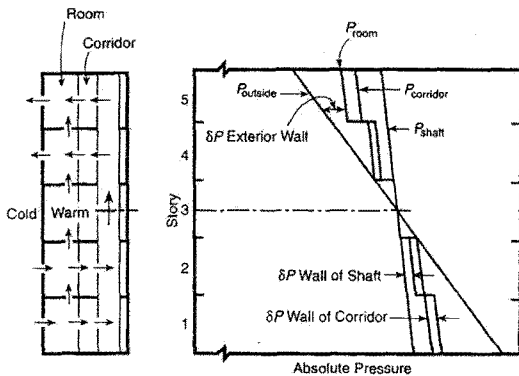
연기의 확산

일반적으로 초고층 건축물은 엘리베이터 샤프트나 계단실 등으로 기류가 이동하게 되어 그림 2와 같은 압력분포를 나타내게 된다. 이와 같이 연돌효과로 인하여 발생하는 압력은 건물의 중성대에서 멀어지는 고층부 및 저층부로 갈수록 증가하게 되고 해당 층의 엘리베이터 문이나 출입문에서 과도한 압력으로 인한 오작동 및 소음이 발생하게 된다. 그러나 더 심각한 문제는 건물의 저층부에서 화재 발생 시 이러한 연돌효과로 인하여 중성대 이상의 모든 층으로 연기가 급속도로 확산되게 된다는 것이며 이렇게 화염이 엘리베이터 샤프트로 전달되었을 때 외피의 기밀성

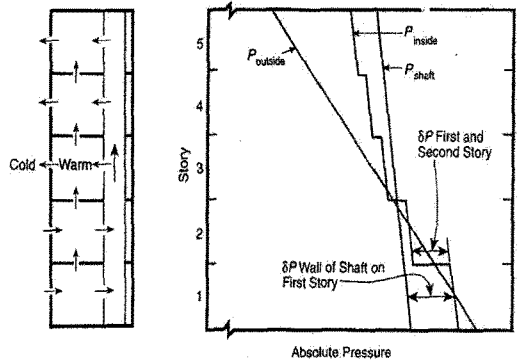
이 떨어질 경우 샤프트 내의 연기는 모두 실내로 유입되어 심각한 문제를 초래하게 된다는 것이다.

그림 4와 그림 5는 캐나다의 IRC(Institute of Research in Construction)에서 개발한 네트워크 모델로 고층빌딩의 연기 이동을 구현한 결과이며 모든 모델은 빌딩 내에서 연기가 일반 공기의 이동패턴을 따른다고 가정하며 연기가 혼합과정에서 즉각적으로 완전하게 공기와 혼합된다고 가정하였다²⁾. 그림 4는 동계 연돌효과로 인한 건물 내 기류 이동을 나타내며 그림 5는 건물내 2개의 샤프트를 갖는 경우 다른 한쪽에서 화재가 발생하여 온도가 상승하고 연돌효과 및 화재로 인한 공기 팽창으로 연기가 이동하는 모습을 나타내고 있다. 그림 5의 두개의 엘리베이터 샤프트 중 왼쪽의 샤프트에서 화재가 발생하였으며 이때 계절은 하계였음에도 불구하고 화재로 인한 연돌효과는 매우 심각하게 발생하는 것으로 나타났다.

다음으로, IRC 네트워크 모델로 20층의 개방형 모형빌딩에서 화재층의 농도에 의해 연기 농도가 퍼지는 비정상상태에 대한 계산이 수행되었다. 화재층의 공기 온도는 24℃였으며 빌딩 내의 다른 공간의 온도는 모두 같다. 외기 온도는 -18℃였으며 공기 유동패턴은 연돌효과에 의해서만 발생하였고 화재로 인한 부력의 영향은 포함하지 않았다. 그림 6은 연돌효과 상황에서 시간에 따라 모형 건물 내부의 상대

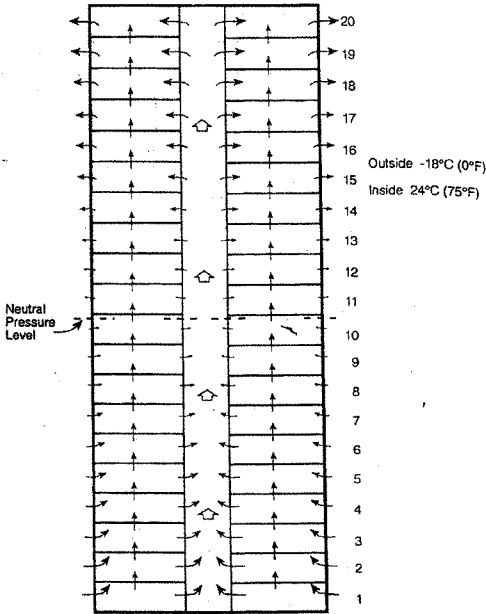
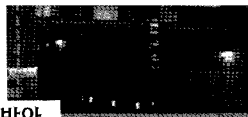


[그림 2] 샤프트가 있는 고층건물에서의 연돌효과로 인한 압력분포²⁾

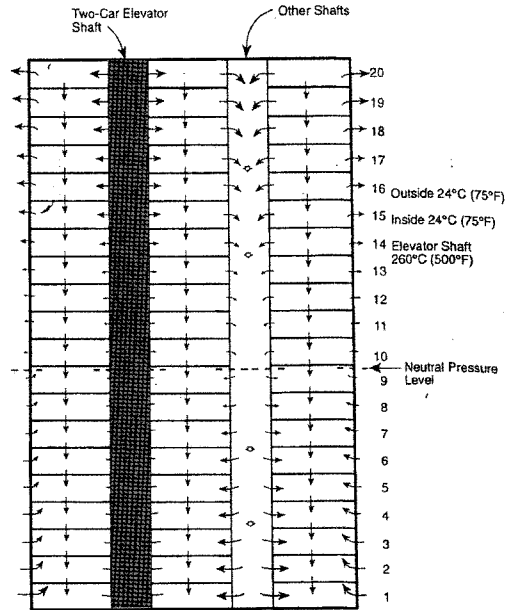


[그림 3] 샤프트가 있는 고층건물에서의 연돌효과로 인한 압력분포(1층에 큰 개구부가 있는 경우)²⁾

2) Tamura, G. T., Smoke Movement and control in High-rise Buildings, National Fire Protection Association, 1994



[그림 4] 동계 연돌효과로 인한 기류 이동 모습²⁾



[그림 5] 엘리베이터 샤프트 내 화재 발생 시 기류 이동 모습²⁾

시간	5분			10분			15분			20분			25분			30분			
	층수	실	엘리베이터	실	엘리베이터	계단실	실	엘리베이터	계단실	실	엘리베이터	계단실	실	엘리베이터	계단	실	엘리베이터	계단실	
20																			
19		■			■			■			■			■			■		
18		■			■			■			■			■			■		
17		■			■			■			■			■			■		
16		■			■			■			■			■			■		
15		■			■			■			■			■			■		
14		■			■			■			■			■			■		
13		■			■			■			■			■			■		
12		■			■			■			■			■			■		
11		■			■			■			■			■			■		
10		■			■			■			■			■			■		
9		■			■			■			■			■			■		
8		■			■			■			■			■			■		
7		■			■			■			■			■			■		
6		■			■			■			■			■			■		
5		■			■			■			■			■			■		
4		■			■			■			■			■			■		
3		■			■			■			■			■			■		
2		■			■			■			■			■			■		
1		■			■			■			■			■			■		

(화재 발생층의 연기 농도 = 1.0, ■ 임계값 ≥ 0.01, 1층에서 화재 발생, 외기온도 -18°C)

[그림 6] 연돌효과로 인한 연기 농도 패턴²⁾

적인 농도 변화를 나타내고 있다. 초기 연기 농도는 1층에서 1.0이고 나머지 층에서는 0.0인 것으로 가정하였다. 계산 결과 5분만에 엘리베이터 샤프트는 19층까지 임계농도(재실자의 안전에 대한 임계값으로 화재층 연기농도의 1% 이상으로 가정)이상으로 올라갔으며 15분 경과 후, 13층에서 20층까지의 해당층의 실과 1층에서 13층까지의 계단실에 연기농도가 임계농도 이상으로 올라갔으며 30분 경과 후 3층에서 10층 사이의 해당층의 실을 제외하고는 모두 임계수준을 넘었다. 이는 연돌효과로 인한 역기 농도 패턴의 특징을 보여준다. 연돌효과 상황에서 빌딩은 연기 오염과 거주자의 피난에 관해서는 저층부에서 발생하는 화재가 최악의 조건이 된다²⁾.

화재 발생시 화염 및 탈출로 인하여 1층의 유리창이나 문이 깨지는 경우가 발생하게 되는데 이와 같은 경우 그림 3과 같은 형상으로 압력분포가 달라지게 된다. 1층 엘리베이터 샤프트에 가해지는 압력은 1층이 밀폐되어 있는 경우보다 더욱 증가하게 되어 더 많은 기류가 1층 엘리베이터 샤프트로 유입되게 되며 건물의 중성대는 더 낮은 저층부로 이동하게 된다. 만약 건물의 지하층이나 저층부에서 화재가 발생할 경우 1층에 발생한 큰 개구부로 인하여 건물의 전 층에 걸쳐 연기가 확산되어 매우 심각한 문제를 초래하게 된다.

실제 사례로 북미지역의 MGM Grand Hotel에서의

화재 발생 사건을 들 수 있다.

MGM Grand Hotel은 26층의 객실과 1층에 대규모의 카지노, 영화관, 레스토랑 및 컨벤션 센터를 가진 건물이다. 화재는 1층의 레스토랑에서 발생하였으며 승강용 엘리베이터 문이 열려있는 상태여서 엘리베이터 샤프트는 연기 확산의 통로가 되었다. 사상자가 난 방의 절반에서 투숙객들이 창문을 켜고 객실을 통하여 연기를 밖으로 환기시키려는 이러한 시도는 연돌효과에 의해서 연기를 복도에서 객실로 유입시켰다. 표 1은 호텔에서 사상자가 발생한 위치를 보여준다. 이는 화재시 연기의 이동을 보여주는 자료이다. 호텔에서 발생한 사상자의 모두가 빌딩의 중성대보다 높은 15층 이상에서 발생하였다²⁾.

이와 같이 초고층 복합건축물에서의 연돌효과는 엘리베이터 문의 오작동이나 소음 등의 문제 뿐만 아니라 화재 발생시 매우 심각한 문제를 초래하게 되므로 이에 대한 대안이 도출되어야 한다.

초고층 건물의 연돌현상 관련 방재계획

수직 샤프트의 지상층 전용/지하층 전용 구획

초고층 복합건축물에서 연돌효과의 발생에 가장 큰 영향을 미치는 것은 바로 지하층을 포함한 저층부에서의 기류 유입이며 그로 인한 엘리베이터 문의 오작동 및 소음 발생들의 문제가 생긴다. 또한 저층

<표 1> MGM Grand Hotel 의 화재시 사상자 발생 위치²⁾

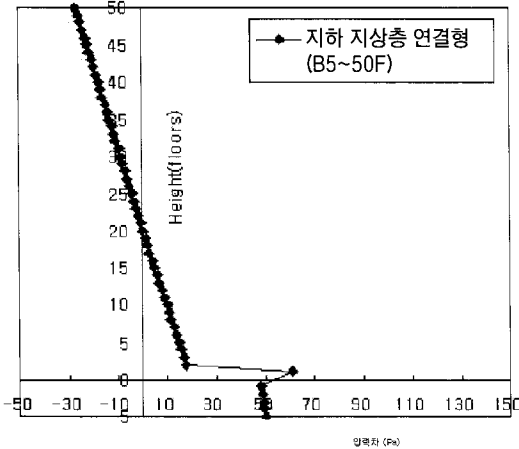
층수	객실	복도	계단	엘리베이터	합계
26	-	-	-	1	1
25	3	2	1	-	6
24	1	9	-	-	10
23	8	3	3	-	14
22	1	1	1	-	3
21	5	1	2	-	8
20	4	6	-	4	14
19	2	-	2	-	4
18	-	-	-	-	0
17	-	-	-	-	0
16	1	-	-	-	1
합계	28	22	9	5	61



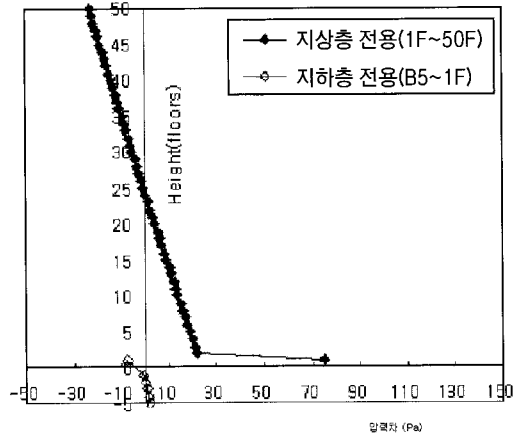
부에서의 화재 발생 시 기류의 이동으로 인해 중성대 이상의 모든 층으로의 연기의 확산은 매우 심각한 문제로 제시되었다. 이에 대한 방안으로 초고층 건축물에서의 수직샤프트를 지상층 전용/지하층 전용으로 구획할 것을 제안한다. 수직 샤프트를 지상층 전용/지하층 전용으로 분리하는 것은 초고층 복합건축물에서 전반적으로 연돌효과로 인해 엘리베이터 문에 가해지는 압력차를 줄일 수 있게 된다. 그림 7의 a)는 엘리베이터 샤프트가 구획없이 하나로 설계된 경우의 압력분포이며 b)는 지상층 전용/지하층 전용으로 구획된 경우의 압력분포를 나타낸다. 엘리베이터 샤프트를 지상층 전용/지하층 전용으로 구획한 경우 전체적으로 엘리베이터 문에 걸리는 압력차가 감소하였다. 그러나 지하층 전용 엘리베이터 문의 1층에서의 압력은 오히려 기류가 유출되는 방향으로 형성된 것을 볼 수 있는데 이는 지하층에서의 화재 발생 시 지하층 전용 샤프트에서 연기가 1층으로 유출되어 다시 지상층 샤프트로 이동하게 된다는 것을 의미한다. 그러므로 수직 샤프트의 지상층 전용/지하층 전용 구획 시 각 샤프트 승강구 통로에 전실을 설치하여 반드시 확실한 내화구획이 이루어

져야만 한다.

캐나다의 경우 소방법(NRC-CNRC)³⁾에서 초고층 건물에 대한 조항을 따로 명시하고 있다. 그 중 주목할 만한 내용은 “각 조항에는 지상층을 담당하는 비상계단이 지하층을 담당하는 비상계단과 분리될 것이며, 각 샤프트로의 연기 유입을 제한할 것을 포함한다. 마찬가지로, 지상층의 엘리베이터 샤프트와 서비스용 샤프트가 지상층 부근에서 구획될 것을 조건으로 하거나, 지하층에서 그 위에 있는 층으로의 연기 이동통로의 역할을 못 하도록 설계할 것을 명한다.”라고 규정하고 있다는 것이다. 초고층 건물에서 비상계단을 지상층 전용과 지하층 전용으로 분리하는 것은 매우 중요한 사항이다. 국내 관련 현행법⁴⁾에서와 같이 고층건물에서 비상계단을 지상층에서 지하층까지 모두 직통계단으로 설계하는 경우 화재 발생 시 거주자들은 연기로 인하여 피난층을 찾는 데 어려움을 겪게 될 뿐만 아니라 지하층에서의 화재 발생 시 건물 내 전 층으로 연기가 확산되어 심각한 문제를 초래하게 된다. 그러나 비상계단이나 엘리베이터 샤프트 등의 수직 샤프트를 지상층 전용/지하층 전용으로 구획할 경우 지하층의 화재 발생 시, 지



a) 지상층과 지하층이 연결된 경우



b) 지상층과 지하층이 분리된 경우

[그림 7] 엘리베이터 문에 걸리는 압력차

3) NRC-CNRC National Building Code of Canada 2005
 4) 건축법시행령 제34조 [직통계단의 설치 기준]

상층으로의 연기 확산을 차단할 수 있으며 대피 시 피난층을 찾는 데에도 훨씬 유리한 상황이 된다.

피난층의 저층의 복합공간 및 지하층 연결부 기획

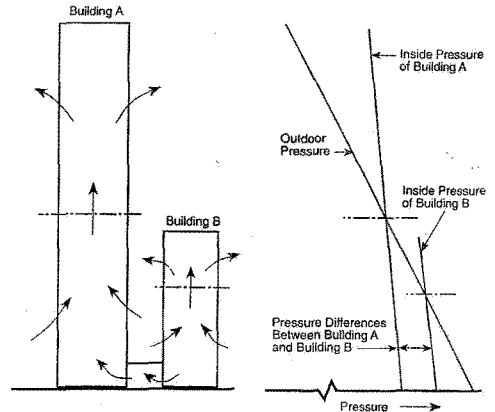
최근 지어지는 초고층 복합건축물의 경우 쇼핑물이나 운동시설을 갖춘 저층건물이나 지하공간을 갖고 있는 것이 대부분이다. 이러한 경우 초고층 건축물의 현관 로비층에는 회전문이나 방풍실, 엘리베이터 전실 등을 적용하여 고층용 엘리베이터 샤프트의 외기의 유입을 막아 연돌현상으로 일어나는 문제점을 줄이고 있다. 그러나 저층의 공용건물 및 지하 주차장과 연결된 통로에는 별다른 기획 없이 설계를 하는 것이 대부분이어서 겨울철 연돌현상발생시 기류 유입통로의 역할 및 지하층 및 저층 공용건물에서의 화재 발생 시 초고층 건축물로의 연기 확산통로의 역할을 하게 된다. 초고층 건축물에 지하공간이 연결되어 있거나 높이가 다른 두 건축물이 연결되어 있을 경우 지하공간이나 저층 건축물 내 기류

는 모두 초고층 건축물과의 연결부를 통해 고층건물로 유입된다. 그 후 초고층 건축물의 엘리베이터 샤프트나 비상계단 등의 수직 샤프트를 통해 상승한 후 고층건물의 중성대 이상의 층으로 이동하게 된다. 따라서 초고층 복합건축물의 경우 지하공간 및 저층 공용건물과 연결된 연결통로의 기류이동을 막기 위한 기획이 반드시 적용되어야 한다. 그림 8은 회전문으로 현관 로비층에서 고층용 엘리베이터와 주 출입문이 있는 고층용 전용로비 공간과 지하층 환승 엘리베이터 및 연결통로가 위치한 지하층 연결로비공간을 구획한 모습을 나타낸다.

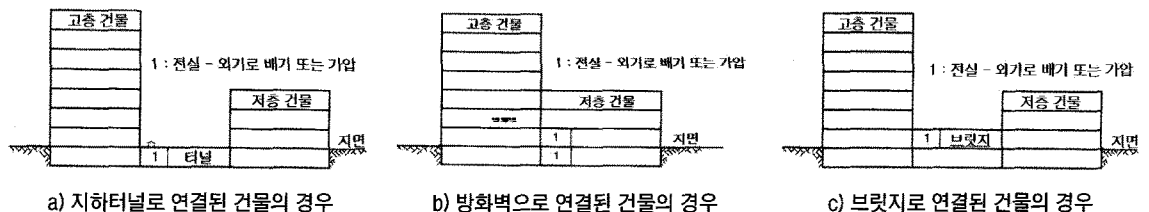
캐나다에서는 소방법(NRC-CNRC)³⁾의 초고층 건물에 대한 조항에서 높이가 다르고 서로 연결된 두 건물에 대한 내용을 규정하고 있다. 서로 다른 높이를 갖는 두 건물이 연결되어 있을 경우 동계 연돌효과 발생 시나 저층건물에서의 화재 발생 시 두 건물 사이에는 그림 9와 같이 압력분포가 형성되어 저층건물에서 고층건물로 기류가 이동하게 된다. 따라서



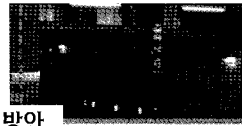
[그림 8] 초고층 건축물 로비에서 저층건물과의 연결부위에 설치된 회전문



[그림 9] 연결된 두 건물사이에서의 기류이동 및 압력분포



[그림 10] 높이가 다른 두 건물에서의 연결부 기획³⁾

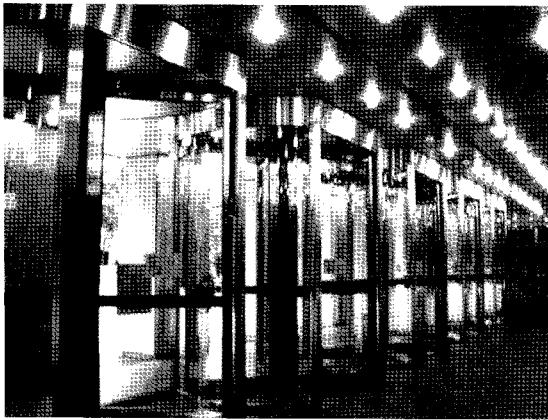


이러한 연결부에 전실을 설치하며 전실에는 연기를 외부로 방출하는 커다란 배기구를 설치하거나 기계적인 가압을 실시하여 두 건물간의 연기 이동을 차단하도록 규정하고 있다. 그림 10에서 "1"은 각 경우에서 두 건물간의 연결부에 대한 전실의 설치 위치를 나타내고 있다.

외부 연결 출입문 및 외피의 기밀화

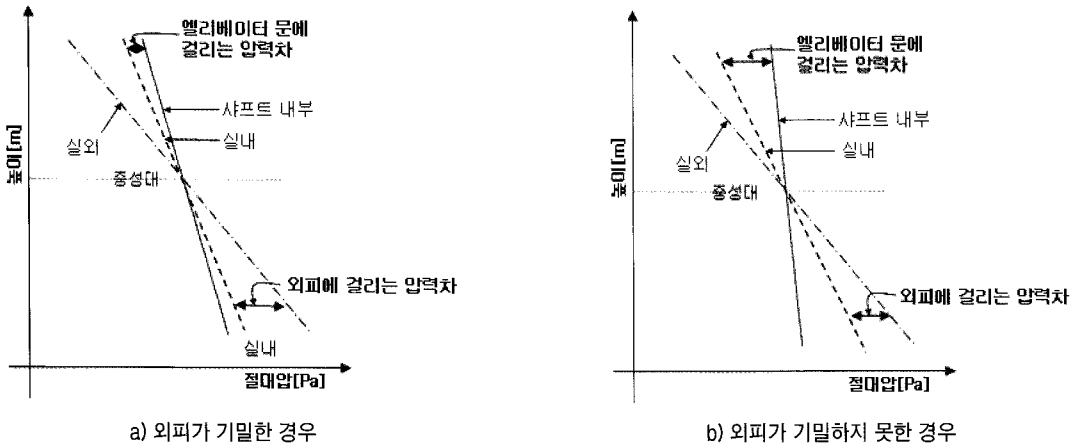
초고층 건축물에서 연돌현상 발생 시 현관 로비층을 포함한 저층부의 모든 외부 출입문은 외기가 가장 많이 유입되는 중요부로서 가장 기밀하게 처리되어야 하는 부분이다. 이를 위해서는 회전문을 적용

하는 것이 가장 효과적이다. 방풍실의 경우 다수의 사람이 출입하게 되면 두개의 문이 모두 열리게 되는 경우가 발생하여 외기의 유입이 심각해지게 되지만 회전문의 경우 출입 여부에 상관없이 침기면적이 동일하므로 현재 가장 기밀성을 확보할 수 있는 문의 형태이다. 회전문 적용 시 소수의 대형회전문 보다 다수의 소형 회전문을 적용할 것을 권하고 있는데 이는 출입 시 편리함과 안전성의 확보 뿐만 아니라 회전문 회전 시 바람의 영향으로 유입되는 기류도 줄일 수 있기 때문이다. 그림 11은 초고층 건축물의 로비층에 설치된 다수의 소형 회전문의 모습을 나타낸다.



[그림 11] 다수의 소형 회전문이 설치된 초고층 건물 로비

초고층 건축물에서 외피의 기밀도는 그림 12와 같이 건물 전체에 연돌효과로 인해 발생하는 압력분포에 영향을 미치게 되는데 외피가 기밀할수록 외피가 분담하는 압력은 더 커지게 되고 엘리베이터 문 등 수직 샤프트 경계면에 걸리는 압력은 줄어들게 된다. 반면, 외피의 기밀도가 떨어지게 되면 외피에서 분담하는 압력이 줄어들어 엘리베이터 문에 걸리는 압력이 더 증가하게 되어 엘리베이터 문이 오작동 및 소음이 증가하게 된다. 또한 샤프트를 타고 저층부에서부터 올라오는 기류가 실내로 더 많이 유입되게 되어 저층부의 화재 발생 시 수직 샤프트를 타고 상승한 기류가 실내로 더 많이 유입되게 되는 것이다. 따라서, 건물 외피의 기밀도는 최대한 확보해 주는 것이 초고층 건축물에서의 연돌현상 저감



[그림 12] 외피의 기밀도에 따른 건물 내 절대압력 분포

및 화재 발생 시 연기의 이동을 저감할 수 있는 방안이라 하겠다.

결론

초고층 건축물에서 발생하는 연돌효과는 엘리베이터 분의 오작동이나 소음 등의 문제 뿐만 아니라 화재 발생시 고층부로의 연기 확산이라는 매우 심각한 문제를 가중시키게 되므로 이에 대한 대안이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내의 초고층 건축물의 화재관련 문헌조사를 수행하였고, 화재 발생 시 연돌현상으로 인해 가중되는 연기의 확산을 차단하기 위한 방재설계 방안을 다음과 같이 도출하였다.

- (1) 엘리베이터 샤프트나 비상 계단실과 같은 수직 샤프트는 지상층전용/지하층전용 구획되어야 하며 구획시 각 샤프트 승강구 통로에 전실을 설치하여 확실한 내화구획이 이루어져야만 한다.
- (2) 대규모 지하공간이나 저층건물과 연결된 초고층 건축물의 경우 지하공간 및 저층건물과의 연결통로에 연기의 이동을 차단하기 위해 외기로 연기를 배출하거나 가압이 가능한 전실이 반드시 설치되어야 한다.
- (3) 건물 저층부 주 출입문 및 외피의 기밀도를 최대한 확보해 주는 것이 초고층 건축물에서의 연돌현상 저감 및 화재 발생 시 연기의 이동을 저감할 수 있다. (*)