

# 초고층건물에서 발생하는 굴뚝효과 방지대책

초고층건물의 건설이 증가되고 있지만 건물외피와 출입문의 기밀도가 낮게 유지될 때, 이러한 누설면적과 층별로 구획할 수 없는 수직샤프트(계단실 등)와 직렬로 배치될 경우, 필연적으로 발생하게 되는 굴뚝현상(stack effect)의 발생원인과 차압크기 산정하는 방법 및 예방대책을 소개하고자 한다.

권 용 일

신흥대학 건축설비과(yikwon@shc.ac.kr)

박 명 식

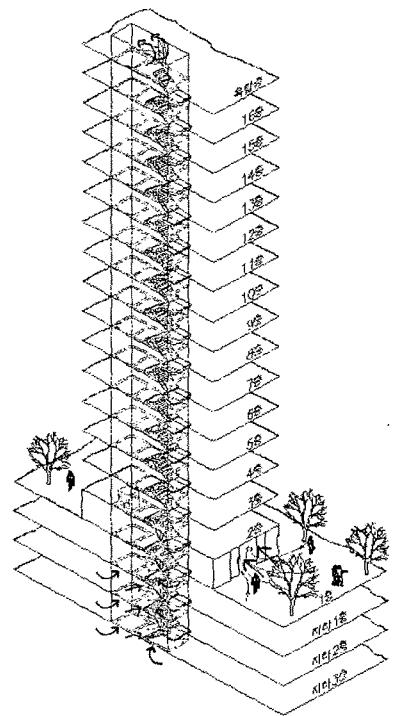
현대건설(주) 기술개발원 기술연구소(mspark@hdec.co.kr)

## 머리말

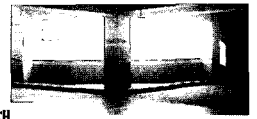
최근, 초고층으로 건설되는 주거용건물이 증가하고 있다. 이러한 초고층건물은 높이변화에 따라 상부와 하부의 압력차이가 증가되지만 사람들의 통행로를 확보하기 위해, 출입문을 설치하며 그림 1과 같이 상부와 하부에 설치된 출입문으로 외기의 유입, 유출현상이 발생된다. 비록 건축물의 외피기밀도가 높게 유지되어도 출입문의 밀폐도가 낮게 유지되면 겨울철에 건축물하부(1층 및 지하층)에 위치한 출입문에서 발생한 압력차이로 인해 그림 1과 같이 외기가 유입되고 상부에 위치한 옥탑층 출입문으로 실내공기가 유출되는 현상이 발생한다.

이와 같은 수직방향 기류유동의 형성은 층별로 구획할 수 없는 수직관통로(엘리베이터 pit와 비상계단실)와 인접하여 출입문이 직렬로 설치되기 때문이며 이때, 발생하는 유동현상을 굴뚝효과(stack effect) 또는 chimney effect)라고 정의한다. 초고층건물의 수직높이가 증가할수록 상부와 하부의 압력차이가 비례적으로 증가하여 상승기류를 발생시키는 굴뚝효과의 강도가 커지므로 엘리베이터 및 지하주차장 등에 설치된 출입문의 개폐불량 현상과 더불어 피스톤현상에 의해 엘리베이터의 정상운행이 불가능해질 뿐만 아니라 틈새를 통해 외기가 고속으로 유동할 때, 발생하는 소음과 더불어 화재시 연기상승으로 대피로의 확보가 불가능하게 된다. 굴뚝효과에 지배적인 영향을 미치는 외기온도와 건물높이보다

풍압 혹은 누기면적의 크기에 따라 굴뚝효과의 발생 유무가 결정되므로 이러한 문제를 해결하기 위해, 건물의 실내와 실외압력분포를 평가해야 된다. 즉, 여름에는 실내온도가 낮게 유지되기 때문에 굴뚝효과가 발생하지 않지만 풍압에 의해 발생되기도 한



[그림 1] 고층건물에서 외기 유출입 경로



## 초고층건물에서 발생하는 굴뚝효과 방지대책

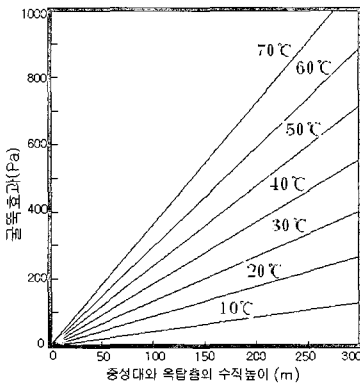
다. 그러므로 본 고는 여러 가지 인자가 복합적으로 작용하여 초고층건물에서 빈번하게 발생하는 굴뚝 효과의 발생원인을 분석하고 방지대책을 수립하는 방안을 제시하고 한다.

### 굴뚝효과

굴뚝효과와 구동력은 실내외공기의 온도차와 수직 방향으로 구획할 수 없는 계단실 혹은 엘리베이터 pit의 수직높이에 의해 발생된다. 이와 더불어 굴뚝 효과에 영향을 미치는 인자는 엘리베이터 이동시 발생하는 피스톤효과, 실내에서 환기를 위해, 외피에 설치된 창문의 개폐여부 및 바람에 의해, 건물외피에 영향을 주는 풍압 등이 있다. 실내와 외부의 온도차가 작은 겨울철에 풍압에 의해 압력차가 크게 유지되어 1, 2층으로 구성된 단층건물에서도 누설면적이 크면 공기누설율이 증가하여 굴뚝효과를 발생시킨다. 풍압과 환기시스템 운전 또는 화재로 인한 부력을 무시하고 초고층 건물의 수직높이 차이에 의해, 건물외피에 발생하는 최대압력차이를 굴뚝효과로 정의하며 그 크기는 실내, 실외의 절대온도와 건물높이를 식(1)에 대입하여 구할 수 있다.

$$\delta P_s = \gamma_i (h - h_{npl}) (T_i - T_o) / T_o \quad (1)$$

여기서,  $\delta P_s$  = 굴뚝현상을 발생시키는 압력차(Pa),  $i$  = 내부,  $o$  = 외부,  $h$  = 건물높이(m),  $h_{npl}$  = 중성대 높이(m)

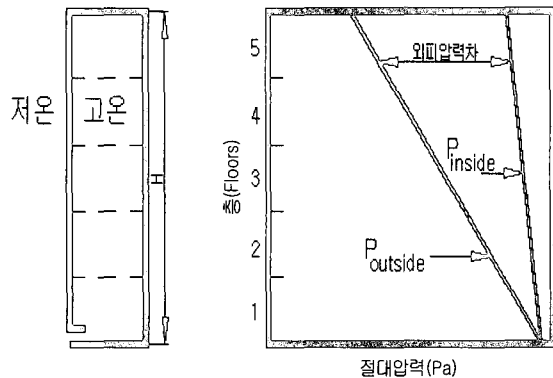


[그림 2] 중성대 높이변화에 따른 굴뚝효과

굴뚝효과에 영향을 미치는 변수인 건물높이와 실내와 실외온도차를 식(1)을 이용하여 그림 2와 같이 굴뚝효과를 구하였으며 건물높이가 낮고 실내, 외온도차이가 적은 경우, 그 크기는 감소함을 알 수 있듯이 겨울철에 굴뚝효과에 영향을 미치는 주요인자는 초고층건물의 외피에 작용하는 풍압으로 예측할 수 있다.

건물에서 발생하는 굴뚝효과를 평가하기 위해, 지금까지 많은 연구가 수행되었으며 굴뚝효과를 정확하게 예측분석하기 위해, 그림 3과 같이 실내외의 압력분포를 평가한다. 그림 3의 건축물은 하부층에 큰 개구부(출입문)가 존재하지만 층별로 내부구획이 없고 바닥에 하나 이상의 개구부를 가지며 내부가 외부보다 높은 온도로 유지될 경우, 수직높이에 따른 굴뚝효과를 나타내고 있다. 하부층 개구부 면적이 크면 실내와 실외의 압력과 온도가 평형을 유지하는 중성대가 형성된다. 그러나 고속엘리베이터를 타고 올라갈 때 귀가 멍멍해지는 현상이 발생하듯이 절대압력은 수직높이가 올라갈수록 낮아진다.

높이에 따른 실내공기의 압력강하는 그림 3과 같이 밀도가 상대적으로 높은 실외공기의 압력강하보다 낮게 나타난다. 따라서 실내의 절대압력이 외부의 절대압력보다 높게 유지되고 이러한 수평방향의 압력차이가 증가할수록 굴뚝효과를 발생시키는 외력이 증가된다. 그림 3의 건물높이가 H=160m이고 실내와 실외의 압력이 동일한 중성대높이가  $h_{npl} = 0m$ 이며 실외온도가 -25℃, 실내 온도가 20℃인 경



[그림 3] 중성대 높이변화에 따른 굴뚝효과

우, 식(1)에 대입하여 구한 굴뚝효과는 약 340 Pa이며 이 값은 최상층에서 발생하며 건물의 최상층과 최하층에서 발생하는 최대압력차이를 의미하는 것이다.

### 중성대(Neutral pressure level)위치

건물외피에 위치한 개구부의 종류와 바닥면의 기밀도에 따라 차이 나게 형성되는 굴뚝효과에 의해 그림 4와 같이 중성대 형성지점이 다르게 나타난다. 건물외피에 공기가 유입, 유출되는 개구부는 여러 층에 불규칙하게 존재하게 된다. 중성대를 기준으로 건물외피의 상부와 하부에 동일한 면적의 개구부가 존재하고 바닥면에 일정한 누설면적이 존재할 경우, 유동저항이 일정하므로 내부의 구획이 없으며 난방이 되는 빌딩에서 발생하는 굴뚝효과는 그림 4(a)와 같이 3층 수직높이 중앙에서 중성대가 발생하고 이 중성대를 기준으로 최하층 바닥면과 최상층 천정면에서 발생하는 최대 압력차이에 의해, 건물 전체적으로 1층에서 외기가 유입되어 5층으로 상승하는 일방향 유동이 형성된다. 이는 하부에 위치한 출입문 작용하는 압력이 내부보다 외부가 고기압이고 상부에 위치한 출입문에 작용하는 압력이 내부가 외부보다 고기압이라는 것을 의미한다. 그러나 그림 4(a)와 다르게 층을 구획하는 바닥면의 기밀성이 높고 각 층별로 외피의 상부와 하부에 누기면적이 그림 4(b)와 같이 위치한다면 중성대는 각 층 수직높이의 중앙지점에 위치하게 될 것이다. 그림 3과

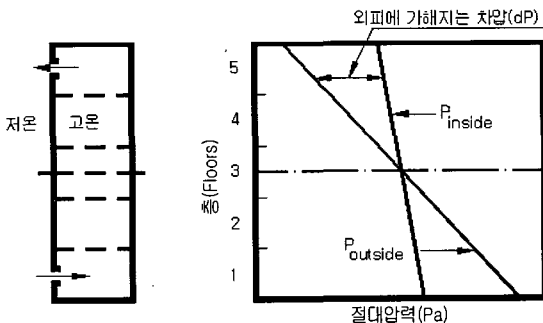
그림 4(a) 및 그림 4(b)와 같이 중성대의 형성지점이 다른 것은 누설지점의 위치와 누설면적비에 영향을 받기 때문이므로 중성대가 발생하는 지점은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$h_{npl} = \frac{H}{1 + (A_1/A_2)^2 T_i/T_o} \quad (2)$$

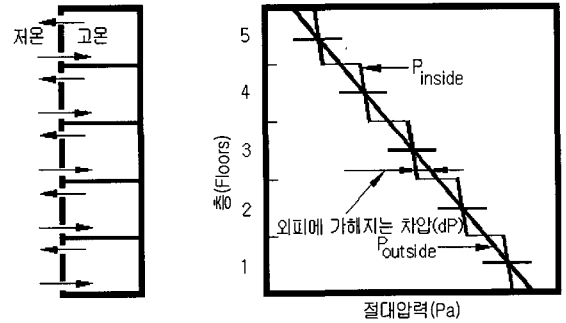
여기서,  $A_1$ 는 하부개구부 면적이며  $A_2$ 는 상부개구부 면적이고  $H$ 는 건물높이이다. 또한  $T_i/T_o$  ( $K$ )는 실내와 실외공기의 밀도차를 고려하기 위해 적용되었으며 실내와 실외의 온도차가 증가할수록 압력기울기와 압력차도 증가된다. 그러나 건물 외피에 존재하는 누설구 등은 그림 3, 그림4(a) 및 그림 4(b)와 같이 균일하게 분포되지 않아도 중성대를 기준으로 한 유입유량과 유출유량은 항상 동일하게 유지된다.

### 내부가 구획된 실제건물의 굴뚝효과

건물내부가 그림 3과 같이 구획되지 않으면 굴뚝효과에 의한 압력차는 식(1)에서 구한 압력차이만큼 건물높이가 증가함에 따라 선형적으로 감소하게 된다. 그러나 층별로 내부가 실내, 복도 및 계단실을 구성하는 외벽, 내벽, 그리고 수직샤프트의 벽체가 직렬로 형성된 누설면적에 따라 차이 나는 압력에 의해 직렬유동이 발생하게 된다. 그림 5(a)는 주거용 초고층건물과 같이 실내가 수직샤프트와 복도로 격리되어 있다. 이 경우, 샤프트내의 수직기류에 의한 마찰손실을 무시할 정도이므로 높이변화에

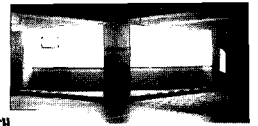


(a) 상부와 하부외피 및 바닥면의 개구부



(b) 층별로 상부와 하부외피의 개구부

[그림 4] 건물외피 및 바닥의 누설면적에 따른 중성대 및 굴뚝효과



초고층건물에서 발생하는 굴뚝효과 방지대책

따른 밀도차이만큼 압력이 선형적으로 감소하지만 각 층의 샤프트와 실내벽체에 존재하는 개구부는 저항이 크기 때문에 층별로 압력강하가 급격히 발생하게 된다. 그러므로 건물내부에 구획된 벽체에 의해 유동저항이 증가하면 층간 압력차와 수직샤프트 벽체양면의 압력차가 증가하고 외벽에 대한 압력차는 감소하게 되므로 실제 빌딩에서 굴뚝효과에 의해 유발된 공기유동은 그림 5(a)에서 도시한 각 경로를 통하여 발생한다. 그러나 건물의 높이와 층수가 증가하면 유동경로의 총 유동저항은 수직방향으로 개방된 계단실, 엘리베이터샤프트에서 존재하게 된다.

이와 같이 층별로 내부가 구획된 건물은 유동저항이 적은 수직샤프트를 제외하고 층별로 구획된 벽체에서 압력강하가 크게 발생하므로 건물전체에 영향을 미치는 굴뚝효과를 평가하기 위한 총굴뚝효과는 외벽에 대한 압력차의 합과 꼭대기, 바닥에서의 압력차의 합은 식(3)과 같이 표현된다.

$$\delta P_T = \delta P_{ewT} + \delta P_{ewB} + \sum_{i=1}^{n-1} \delta P_{fi} \quad (3)$$

여기서,  $\delta P_T$  = 총 굴뚝 효과

$\delta P_{ewT}$  = 꼭대기에서 외벽을 통한 압력차,

$\delta P_{ewB}$  = 바닥에서 외벽을 통한 압력차,

$\delta P_{fi}$  = i번째 층의 압력차,

$n$  = 총 층수

내부가 벽체로 구획된 건물의 외벽체에서 발생하는 압력강하( $\delta P_w$ )는 내벽체의 유동저항으로 인해, 내부가 벽체로 구획되지 않은 건물에서 발생하는 최

대압력차( $\delta P_s$ )보다 작게 된다. 이 비율은 식(4)와 같이 열통풍계수(thermal draft coefficient,  $\gamma$ )로 정의한다.

열통풍계수는( $\gamma$ )는 내부분리벽체의 기밀도에 대한 외벽체의 기밀도를 나타내는 것으로서 굴뚝효과에 의한 압력차이를 해석하는 변수로 사용된다.

$$\gamma = \delta P_w / \delta P_s \quad (4)$$

여기서,  $w$ 는 내부벽체가 존재하는 건물의 외벽체,

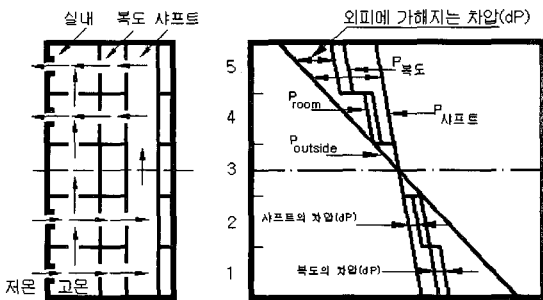
$s$ 는 내부벽체가 존재하지 않는 건물

실제 건물에서 열통풍계수( $\gamma$ )는 0(기밀도가 낮은 외피)과 1(기밀도가 높은 외피)사이에서 존재하며 3층 규모의 사무실에 대해 열통풍계수를 평가한 결과, 0.6에서 0.8사이로 보고하고 있다. 이는 외벽에 비하여 내부벽체의 기밀도가 낮음을 의미한다. 즉, 임의 층에 공조시스템이 운전하는 경우는 정지된 경우보다 기밀성이 낮아 통풍계수가 낮게 나타나게 된다. 외벽체로부터 내부에 위치한 수직샤프트까지 직렬유동을 발생하는 개방형 건물의 열통풍계수( $\gamma$ )는 식(5)와 같이 누설면적을 이용하여 구할 수 있다.

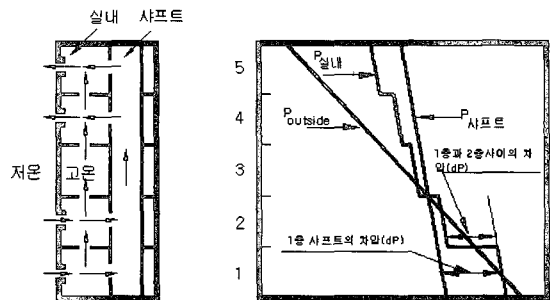
$$\gamma = \frac{1}{1 + (A_w + A_v)^2} \quad (5)$$

여기서,  $A_w$  = 외벽체의 누설면적,  $A_v$  = 수직샤프트를 구성하는 벽체의 누설면적

외벽체에서 발생하는 압력차는 식(6)과 같이 구할 수 있으며 수직샤프트를 둘러싼 벽체에서 발생하는 압력차는 식(7)과 같은 관계를 가진다.



(a) 복도와 샤프트로 분리된 건물



(b) 1층 대형출입문이 열려있는 샤프트 분리 건물

[그림 5] 수직샤프트와 복도에 따라 영향을 받는 압력분포

$$\delta P_w = \gamma \delta P_s \quad (6)$$

$$\delta P_v = (1 - \gamma) \delta P_s \quad (7)$$

만약 엘리베이터 수직샤프트에 인접하여 로비가 위치하면 직렬유동이 발생하는 엘리베이터 로비 벽체까지의 압력차는 식(8)과 같이 벽체면적비를 고려하여 구할 수 있다.

$$\delta P_l = \frac{1}{1 + (A_l/A_e)^2} \delta P_v \quad (8)$$

여기서, 첨자  $l$  은 엘리베이터 로비를 구성하는 벽,  $e$  는 로비와 접한 엘리베이터 샤프트의 벽을 의미한다. 식(8)에  $\delta P_v$  를 대입하면 식(9)와 같이 굴뚝효과에 대한 관계식이 성립된다.

$$\delta P_l = \frac{(1 - \gamma)}{1 + (A_l/A_e)^2} \delta P_s \quad (9)$$

만약 하부층에 설치된 대형 출입구가 열려있을 경우, 열통풍계수( $\gamma$ )는 0에 도달할 것이며 수직샤프트의 벽에서 발생하는 압력차는 최대가 되고 그림 3과 같이 굴뚝효과( $\delta P_s$ )에 의해 나타나는 압력차와 유사하게 나타날 것이다. 압력차의 증가는 엘리베이터 pit와 계단실로 유입되는 외기량을 증가시키므로 초고층건물의 최하층에 위치한 대형 출입문의 기밀도를 향상시켜야 한다.

### 빌딩내의 바람효과

자연현상으로 발생하는 바람은 초고층건물에 풍압을 형성하므로 건물구조를 위해 고려해야 될 뿐만 아니라 빌딩내부에 불필요한 공기의 유출입과 공기이동을 유발시키기도 한다. 그러나 풍압은 자연환기 측면에서 효과적으로 사용되기도 하지만 강제환기를 수행하는 공조시스템에 대해서는 역기능을 제공할 수 있으므로 환기용 개구부를 외벽체에 설치하는 경우, 풍압계수와 풍압분포를 다음과 같이 고려해야 한다.

### 빌딩에 영향을 미치는 풍속

지표에 형성되는 난류유동경계층으로 인하여 약 600 m 정도에 달하는 대기 두께는 속도와 상류의 표면조도에 의하여 변화된다. 그리고 도심에서는 다양

한 높이의 건물들이 밀집되어 있지만 바다, 사막과 같이 조도가 낮은 장소도 존재하므로 표 1에 정의된 바와 같이 평균속도지수( $\alpha$ )를 고려하여 건물이 위치한 임의 높이에서 평균풍속을 식(10)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{V_h}{V_g} = \left( \frac{h}{h_g} \right)^\alpha \quad (10)$$

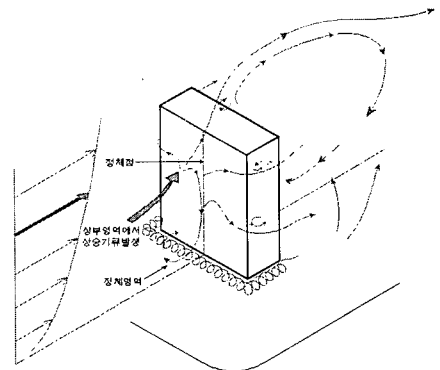
여기서  $V_h$ =높이  $h$ 에서의 평균풍속(m/sec),  
 $V_g$ =고도차에 따른 평균풍속(m/sec),  
 $h$ =지표로부터의 높이(m),  
 $V_g$ =고도차(m),  $\alpha$ =평균속도지수

### 풍압 계수

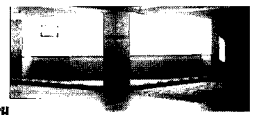
건물주위에 형성되는 유동형태는 바람이 건물의 전면으로 다가와서 지붕으로 상승하거나 측면으로 이동한 기류에 의해 건물의 배면에서 후류(wake)가 형성되어 그림 6와 같이 전면과 배면의 하부에는 정체영역이 형성된다. 빌딩에 걸친 풍압계수는 식(12)와 같이 국소풍압을 빌딩높이에서 풍속으로 구

<표 1> 풍속분포를 구하기 위한 고도차와 승수

지 형	고도차 (Gradient Height) $h_g$ m	평균속도지수 (Mean Speed Exponent) $\alpha$
대양, 사막	250	0.11
소 도시	400	0.25
대 도시	500	0.36



[그림 6] 독립건물에 형성된 경계층



### 초고층건물에서 발생하는 굴뚝효과 방지대책

한 속도수두로 풍압을 나눈 무차원계수이다. 기상학적인 풍속과 풍압계수를 알고 있으면 식(12)를 이용하여 바람방향 전면의 풍압을 구할 수 있다.

$$P_v = \frac{\rho V_H^2}{2} \quad (11)$$

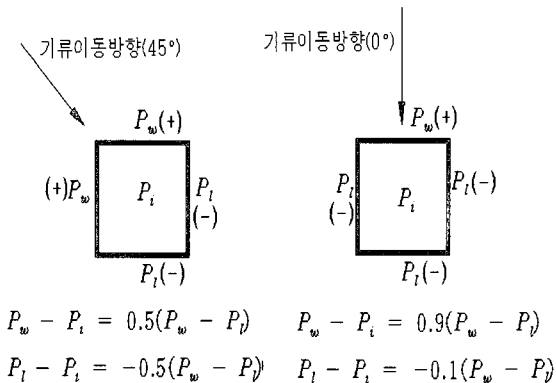
$$C_p = \frac{P_w}{P_v} \quad (12)$$

여기서  $P_v$ =속도 수두(Pa),  $\rho$ =공기 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$ =무차원 국소 풍압계수,  $P_w$ =국소풍압(Pa),  $V_H$ =빌딩 높이에서의 풍속(m/s)

풍압계수( $C_p$ )는 3가지 요소에 의해 좌우된다. 첫째, 빌딩형상, 둘째, 풍향, 셋째, 주위빌딩, 조림, 지표의 영향이다. 풍압계수( $C_p$ )의 정확한 결정은 특정 사이트와 빌딩에 대한 풍동모델 실험에 의해서만 얻어질 수 있지만 기류이동방향이 0°, 45°인 경우, 배면의 풍압계수는 -0.2~-0.4범위이고 바람방향인 전면은 0.2~0.4범위를 유지되기 때문에 바람이 건물에 직교하여 이동할 때, 압력은 전면에서 양의 값을 가지며 배면에서 음의 값을 가진다. 풍압에 의해 형성되는 실내외의 압력차이로 실내로 유입되는 유량은 외벽체의 기밀도에 따라 변화되므로 풍압과 실내의 압력차이는 건물의 전면과 배면의 면적을 고려하여 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{P_w - P_i}{P_w - P_l} = \frac{1}{1 + \left(\frac{A_w}{A_l}\right)^2} \quad (13)$$

여기서,  $P$ =압력,  $A$ =누설구 면적, 첨자는  $i$ =내부,  $w$ =전면,  $l$ =배면

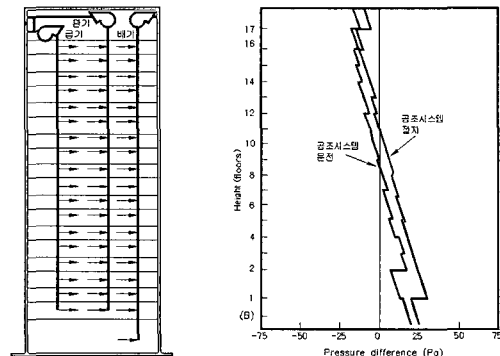


[그림 6] 기류이동방향에 따른 실내외 압력차

그림 7은 정사각형의 평면을 가진 건물의 4면에 동일한 누설면적을 가질 경우, 기류이동방향이 45°, 누설면적비( $A_w/A_l$ )가 1.0이므로 실내 압력은 바람유입 전면벽체와 배면벽체의 표면압력의 평균값으로 유지될 것이다. 그러나 기류이동방향이 0°인 경우, 누설면적비( $A_w/A_l$ )는 1/3이 되므로 실내 압력은 바람방향의 전면 외벽체의 표면압력( $P_w$ )에서 전면과 배면의 압력차의 90%만큼 감소하게 된다. 만약 누설면적비( $A_w/A_l$ )가 현저히 증가되면 실내압력이 풍압에 근사하게 유지되므로 층간 압력 차이가 발생되어 유동경로가 형성된다.

### 공조시스템의 운전과 굴뚝효과

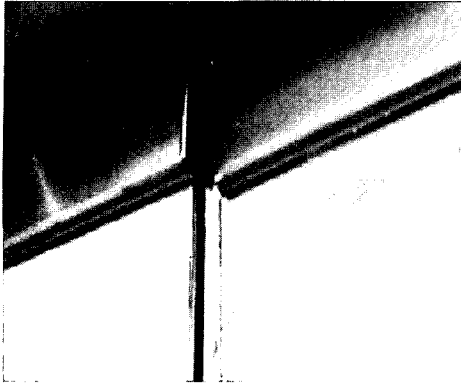
중앙식 공조시스템이 적용된 초고층건물에서 강제적으로 형성되는 기류유동은 일반적으로 그림 8(a)와 같이 형성된다. 공조시스템이 운전될 때, 급기팬퍼와 배기팬퍼를 조정하여 실내를 가압하고 있다. 이는 외벽을 통하여 공기 유입을 줄이기 위해, 수행하고 있지만 가압량은 급기와 배기유량의 비와 건물의 출입문기밀도에 따라 차이난다. 공기조화시스템의 운전과 정지시 발생하는 압력차를 그림 8(b)에 나타내고 있다. 공조시스템의 운전과 비운전 시에 나타나는 외벽에 걸리는 압력차가 실내를 가압한 크기를 나타낸다. 이 가압량은 2.5에서 14.9 Pa 사이에서 변화하며 이는 층별 배기공기에 대한 초과 공급공기의 변화량을 나타낸다. 최고 가압량은 공조시스템이 정지하였을 때, 굴뚝효과에 의해 27.4 Pa의 외



(a) 강제환기 흐름도

(b) 외벽체 압력분포

[그림 8] 공조시스템 운전 유무에 따른 외벽체의 압력분포



[그림 9] 여닫이형 출입문의 폐쇄불량현상

벽체 압력을 유지하였으나 공조시스템이 운전되어 가압에 의해, 12.5 Pa를 유지하는 1층에서 압력감소가 최대로 나타나 가압효과가 큰 것을 알 수 있다.

### 맺음말

본 고에서 지금까지 논의한 바와 같이 건물에서 발생하는 굴뚝효과는 초고층건물의 건설에 의해 주목

받게 되었지만 겨울철에 주로 발생하는 굴뚝효과의 주요인자는 외벽체에 형성된 누기면적과 풍압이 지배적으로 영향을 미치는 것으로 알 수 있다. 이러한 관점에서 굴뚝효과를 방지하기 위해서는 검토해야 될 항목을 정리하면 다음과 같다.

건축적으로 고려해야 될 수동적 방법으로는 초고층건물의 외피기밀도를 높게 유지해야 되며 특히 1층에 설치되는 대형 출입문에 방풍실을 설치해야 된다. 즉, 그림 9와 같은 출입문의 상부와 하부의 문틀이 누기면적이 크게 유지되는 여닫이 출입문을 설치하고 방풍실을 설치하지 않는 경우, 풍압에 의해 다량의 외기가 유입되어 그림 9와 같이 출입문이 열리게 된다.

또한 초고층건물의 계단실의 입구는 칸막이벽으로 구획하거나 전실을 설치하고 계단실의 환기를 위해, 유리창을 설치하면 외기의 유, 출입에 의해 계단실의 중성대의 위치가 변화되므로 겨울철에는 폐쇄해야 한다. 만약 공조시스템이 운전되는 경우는 풍압 혹은 굴뚝효과에 의해 실내로 유입되는 불필요한 외기량을 줄이기 위해서 가압운전을 수행해야 한다. ㉔