

## 고층건축물의 피난경로 가압제연시스템 성능개선대책에 관한 연구

손 봉 세<sup>†</sup>, 김 진 수<sup>\*</sup>

경원대학교 소방방재공학과, <sup>\*</sup>(주)벽산엔지니어링

### A Study on Performance Improvement Measures of Pressurized Smoke Control Systems for Exit Passageways of High-Rise Buildings

Bong-Sae Son<sup>†</sup>, Jin-Soo, Kim<sup>\*</sup>

*Department of Fire & Disaster Protection Engineering, Kyungwon University*

*<sup>\*</sup>Department of Fire Protection Engineering, Byucksan Engineering, Co., Ltd*

(Received August 3, 2009; revision received November 24, 2009)

**ABSTRACT:** One of the biggest problems in smoke control systems for high-rise buildings is stack effect, but there are no recognized methods or measures to solve the problem of stack effect as yet. The stack effect can be overcome by forming the uprising current inside the stair hall properly, but there is a limit to the height in supplying into the stair hall the smoke control air volume to be supplied to a floor in case of escape from fire. The limit to the height can be extended by overcoming the stack effect by pressurizing the stair hall and the ancillary room simultaneously. It can also be anticipated that the stack effect can be overcome by connecting the air supply shaft to the stair hall at the top. As a result of computer simulations using a network type of tool, it is found that adequate performance can be achieved by pressurizing the stair hall only for a building of 190m or less, and up to 360m when pressurizing the stair hall and the ancillary room simultaneously. In all those cases, however, an overpressure venting damper is required which operates within a suitable range for venting the overpressure outside.

**Key words:** Stack effect(연돌효과), Limit flow(한계유동), Limit height(한계높이), Differential pressure dissolution(차압해소), Overpressure exhaust damper(과압배출댐퍼)

#### 기 호 설 명

$A_b$  : 하부 개구부 개구면적 [m<sup>2</sup>]  
 $A_s$  : 샤프트 단면적 [m<sup>2</sup>]  
 $A_t$  : 상부 개구부 개구면적 [m<sup>2</sup>]  
 $c$  : 개구부 배출계수 [무차원]  
 $D_h$  : 샤프트의 수력지름(=  $4A_s/P$ ) [m]  
 $f$  : 샤프트 마찰계수

$P$  : 샤프트 단면의 둘레길이 [m]  
 $\Delta p_f$  : 샤프트 공기유동에 의한 마찰손실 [Pa]  
 $\Delta p_{so}$  : 정지상태의 총 차압 [Pa]  
 $\Delta p_{st}$  : 샤프트 상부 개구부 안팎의 차압 [Pa]  
 $\Delta p_{sb}$  : 샤프트 하부 개구부 안팎의 차압 [Pa]

#### 1. 서 론

고층건물 화재시 주 피난경로인 계단실을 연기의 침입으로부터 보호하기 위한 제연방식으로 가압 제연시스템을 많이 적용한다. 가압구역의 선정은

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-31-750-5713; fax: +82-31-750-8749

E-mail address: bsson@kyungwon.ac.kr

계단실 단독가압, 부속실 단독가압, 계단실과 부속실 동시가압 등 여러 가지 방식이 있다. 그중 계단실을 가압하는 경우에는 계단실 중간층의 출입문이 열릴 때 국소배출에 따른 차압불균형이 문제가 될 수 있으므로 완화대책으로 3개 층 이내의 높이마다 급기점을 두어 계단실 전체 높이에 고르게 급기 하도록 NFPA 92A,<sup>(1)</sup> EN12101-6,<sup>(2)</sup> 일본소방법규, 한국의 화재안전기준<sup>(3)</sup> 등에 규정되어 있으며, 호주기준<sup>(4)</sup> 역시 계단실 전체높이에 걸쳐 고르게 급기 하도록 규정하고 있다. 그러나 계단실의 가압에서 가장 큰 문제는 다음과 같은 것들이다.

- 1) 흡환기나 흡서기에 계단실과 같은 수직 샤프트에서 발생한 연돌효과는 제연성능을 무력화할 수 있다.
- 2) 흡환기의 연돌효과는 계단실 상층부의 피난문을 열기가 곤란하게 하여 피난장애가 된다.
- 3) 특히, 부속실을 가압하는 경우에는 많은 부속실마다 차압조성과 방연풍량의 공급을 일정범위 이내로 충족하기가 대단히 어렵다.

이상은 기본적으로 연돌효과 때문에 발생하는 것으로서, 아직 연돌효과에 대한 뚜렷한 대책은 제시되지 못하고 있다. 건축시설의 사용편의를 위해 여러 가지의 연돌효과 억제 혹은 완화 대책이 강구되고 있으나 피난 시에는 모든 장치들을 해제해야하기 때문에 연돌현상에 노출되게 된다. 이런 상황에서 건물의 기하학적 구조에 의존하는 수동적 대책은 무용지물이 된다. 이 논문에서는 초고층 건물에서 연돌효과를 완화하여 제연시스템의 성능을 실제적으로 확보하는 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 연돌효과

초고층 건물의 연돌효과는 겨울철에 더 큰 영향을 크게 받는다. 연돌효과는 환기에 긍정적인 영향을 주는 면도 있으나, 화재발생시 발생하는 다양한 연소가스가 계단실 등 피난경로에 침투하는 효과를 증대시킨다. 특히, 저층부의 경우 계단실 출입문을 열 때 층 공간에서 계단실로 향하는 기류 때문에 계단실로 연기가 침입하는 것을 막기 어렵다. 계단실은 공기의 유동저항이 큰 구조이므로 공기의 유동을 적절히 제어함으로써 공기의

유동마찰로 인한 압력손실로써 연돌효과를 상쇄하는 것이 가능하다.

### 2.1 연돌효과와 샤프트 유동

샤프트와 건물외부의 기온이 서로 다르면 연돌효과에 의해 압력차이가 발생하며 압력의 차이는 샤프트의 수직위치에 따라 다르다. 샤프트와 건물외부의 기온을 각각  $T_i[K]$ ,  $T_o[K]$ 로 나타낼 때, 하나의 샤프트 내에서 어느 두 지점의 수직높이가  $h[m]$ 만큼 다를 경우, 그 두 지점에서 측정되는 내·외부압력 차이는 대기압 조건에서 식(1)같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta p_{so} = 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) h \quad [Pa] \quad (1)$$

압력차에 의해 샤프트내 공기의 상하유동이 발생하고, 샤프트의 상하부 개구부에서 공기가 유입과 유출을 하게 되는데, 이 유입유출량과 샤프트 상하 유동량이 평형을 이루게 된다. 샤프트내의 공기 유동은 마찰손실을 유발하고, 마찰손실을 제외하고 남은 잔여차압에 의해 외부공기가 샤프트로 유입되고 또한 샤프트로부터 유출되므로, 샤프트 급기량에 따른 총 잔여차압크기를 예측할 수 있다. 개구부가 샤프트의 상하부에 하나씩만 있는 경우를 기술하면 유입(유출)량은 잔여차압과 유입(유출)구의 면적에 의해 결정된다. 각 압력 요소들 간에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\Delta p_{so} = \Delta p_f + \Delta p_{st} + \Delta p_{sb} \quad (2)$$

샤프트의 마찰손실은 유속의 함수로서, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta p_f = f \frac{h}{D_h} \frac{\rho v^2}{2} \quad [Pa] \quad (3)$$

이때의 유속은 위 식(3)을 변형하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = \left( \frac{2\Delta p_f D_h}{f h \rho} \right)^{1/2} \quad (4)$$

또한 이때의 샤프트의 유량은

$$Q = vA_s [m^3/s] \quad (5)$$

이다. 샤프트 유입량과 유출량은 절대량이 같고 또한 샤프트 내부 유동량과도 같으므로, 그 방향성을 무시하면 다음과 같이 유량을 나타낼 수 있다.

$$Q = cA_t \sqrt{\Delta p_{st}} = cA_b \sqrt{\Delta p_{sb}} \quad (6)$$

즉, 상하부 개구부의 차압은 개구부 면적비율의 제곱에 반비례한다. 식(5)과 식(6)의 관계에서 다음의 식을 유도해낼 수 있다.

$$\Delta p_{st} = \left( \frac{vA_s}{cA_t} \right)^2 \quad (7)$$

$$\Delta p_{sb} = \left( \frac{vA_s}{cA_b} \right)^2 \quad (8)$$

식(3), 식(7), 식(8)을 식(2)에 대입하면 다음의 수식을 얻는다.

$$\Delta p_{so} = f \frac{h}{D_h} \frac{\rho v^2}{2} + \left( \frac{vA_s}{cA_t} \right)^2 + \left( \frac{vA_s}{cA_b} \right)^2 \quad (9)$$

상기 식(9)에서 샤프트 유동속도  $v$ 를 제외한 모든 인수들은 설계자가 결정하는 임의요소들이므로, 그 요소들을 결정함으로써 샤프트 유동속도  $v$ 를 구할 수 있으며 샤프트 각부의 잔여차압을 구할 수 있다. 따라서 식(9)을 변수  $v$ 에 대해서 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\Delta p_{so} = \left( f \frac{h}{D_h} \frac{\rho}{2} + \frac{A_s^2}{c^2 A_t^2} + \frac{A_s^2}{c^2 A_b^2} \right) v^2 \quad (10)$$

$$v = \left\{ \frac{\Delta p_{so}}{f \frac{h}{D_h} \frac{\rho}{2} + \frac{A_s^2}{c^2 A_t^2} + \frac{A_s^2}{c^2 A_b^2}} \right\}^{1/2} \quad (11)$$

식(11)로 구한 유속과 식(5)로 구한 유량을 이용하여 식(6)에 대입하면 그때의 샤프트 상하부 개구부 안팎의 차압을 구할 수 있다.

## 2.2 한계유동

마찰손실을 정적상태의 총 차압에 가깝게 놓고

식(4)을 이용하여 한계유동속도를 구할 수 있다. 한계유동속도에서는 샤프트 상하부간의 차압의 차이는 거의 소멸하게 된다. 이 한계유속의 계산은 식(4)에서 마찰손실  $\Delta p_f$ 를 정지상태의 총 차압  $\Delta p_{so}$ 와 같은 값으로 하면 한계유속을 구할 수 있으므로, 식(1)을 식(4)의  $\Delta p_f$ 에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$v = \left( \frac{2\Delta p_f D_h}{f h \rho} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$= \left\{ \frac{2 \times 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) D_h}{f \rho} \right\}^{1/2}$$

식(12)로 구하는 한계유속은 공기조건과 샤프트의 마찰손실계수 및 수력지름에만 관계되고, 샤프트의 높이에는 무관하다. 본 논문에서는 이와 같은 한계유속에 대응하는 유량을 한계유량이라고 하였다. 한계유량이 유동할 때에는 잔여차압이 거의 없으므로 계단실 상하부의 공기 유출·입구는 공기유출입저항이 없도록 계단실 단면적과 같은 개구부이어야 한다. 제연시스템을 설계하는 실제 환경에서는 이렇게 개구부를 만들 수도 없고, 또한 샤프트 내에 어느 정도의 방연차압을 형성해야하기 때문에 이러한 자연유동은 활용할 수가 없다.

## 2.3 강제급기를 이용한 차압 해소

겨울철에는 계단실 바닥에서 차압이 가장 낮고 계단실 꼭대기에서 차압이 가장 높은 선형 차압구배가 형성된다. 계단실의 하부에 공기의 유입구가 없어도, 자연유동과 같은 양의 공기를 계단실 하부에서 공급하고 계단실 상부를 자연유동의 경우와 같은 크기로 개방하면 자연유동의 경우와 같은 차압소실효과를 얻을 수 있다. 한계유량을 공급하면 계단실이 아무리 높더라도 차압의 소실효과를 거둘 수 있으며, 한계유속에서 벗어나면 차압구배가 형성되고, 차압구배의 크기는 한계유속에서 멀리 벗어날수록 더 커지게 된다.

급기유속이 한계유속보다 작아지는 경우에는 유속의 최소값 0에서 차압구배는 정지상태의 총 차압구배가 되고, 급기유속이 한계유속보다 더 커지는 경우는 유속이 빨라질수록 급기점에 가까운 계단실 하부의 차압이 계단실 상부보다 더 커

져서 자연 상태의 차압과는 반대방향의 차압구배를 형성하게 된다. 계단실내 최대허용차압을  $\Delta p_n$ 이라할 때,  $\Delta p_n$ 에서 한계유량을 배출할 수 있는 크기의 개구를 계단실 상부에 만들고 계단실 하부에서 한계유량을 공급하면 된다. 이런 관점에서 식(6)을 이용하여 계단실 상부 개구면적을 계산하면 다음과 같다.

$$A_t = \frac{Q}{c\sqrt{\Delta p_n}} \quad (13)$$

### 3. 적용 이론에 대한 분석

#### 3.1 일반

화재가 발생하여 중간 어디선가 계단실 출입문이 열리면 계단실 부분에는 기류공급이 현저히 줄어들게 되어 차압밸런스가 깨어질 수 있다. 적용 계단실은 층고가 3.6m이고 가로 세로가 각각 2.5m \* 6m인 장방형으로, 상하부 개구부의 면적을 각기 표준 출입문의 크기로 한다. 이 경우 계단실 단면적과 수력저항 및 상하부 개구부 면적은 각각  $A_s$ ,  $= 15[m^2]$ ,  $A_t = A_b = 1.89[m^2]$ ,  $D_h = 3.53[m]$ 이다. 계단실의 최소차압은 BS EN12101-6에서 권장 방연풍속 0.75 m/s의 두 배인 1.5 m/s를 형성할 수 있는 차압, 3Pa로 한다.

BS EN12101-6에서는 피난전용으로 0.75 m/s를 권장하고 있지만, 계단실은 피난용과 소방대용으로 구분하기 어려운 현실적 문제와 유속 0.75 m/s를 발생시키는 미세차압의 제어가 용이하지 않다는 점을 고려하면 배출차압을 3Pa 이상으로 보는 것은 합리적이다. 계단실에 조성된 차압이 80Pa을 초과하면 보통크기의 출입문을 밀어서 열기가 어려워지므로 차압의 최대한계와 최소한계를 각각 80Pa과 3Pa로 설정하고, 그 차이인 77Pa을 연돌효과 극복을 위한 기준으로 한다. 각 출입문은 지상층의 최종 피난문, 화재층과 인접층의 출입문이 열리는 것을 고려하여 3개 층의 문이 열리는 것으로 가정한다. 화재층에 인접층의 배출량은 무시하고 2개층의 배출만을 고려하고 계단실 출입문의 유효개방면적으로 1.5m<sup>2</sup>를 적용한다. 계단실의 출입문을 열 때에는 사람의 몸이 출입문을 어느 정도 가리기 때문에, 실제적으로 표준크기(0.9m \* 2.1m)의 문에서 유동면적이 1.5m<sup>2</sup>를 초과하는 경우는

없을 것이다. 이러한 조건에서 예상 총배출량을 구하면 2.25 m<sup>3</sup>/s된다.

#### 3.2 겨울철의 경우

##### 3.2.1 한계유동

내외기 온도가 각각 20 °C(293.15K), -10 °C(263.15K)인 경우에 연돌효과에 의한 차압은 다음과 같다.

$$\Delta p_{so} = 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) h = 1.35h [Pa] \quad (14)$$

마찰계수  $f$ 는 Achakji and Tamura<sup>(5)</sup>의 Table 2에서 층고 3.6m의 계단, closed tread 값을 취하여 32로 하고,  $c$ 값은 계단실에 대해 흔히 쓰이는 EN 12101-6의 권장 값 0.82를 적용하여 계단실 높이가 100m인 경우에 식(11)을 이용하여 유속을 구하면 다음과 같다.

$$v = \left\{ \frac{\Delta p_{so}}{f \frac{h}{D_h} \frac{\rho}{2} + \frac{A_s^2}{c^2 A_t^2} + \frac{A_s^2}{c^2 A_b^2}} \right\}^{1/2} \quad (15)$$

$$= \left\{ \frac{135}{32 \frac{100}{3.53} \frac{1.2}{2} + \frac{15^2}{0.82^2 \cdot 1.89^2} + \frac{15^2}{0.82^2 \cdot 1.89^2}} \right\}^{1/2}$$

$$= 0.43 [m/s]$$

이때 유량은 식(15)값을 적용하면  $Q = 6.45[m^3/s]$ 된다. 식(16)에서 내외기온이 각각 20 °C(293.15 K), -10 °C(263.15 K)인 경우에, 높이 100m인 표준구조의 계단실에서 1층과 옥상층의 출입문을 완전히 열면 계단실 내부의 연돌효과에 의해 6.45 m<sup>3</sup>/s의 상향유동이 발생하고, 이때 잔여차압은 지상층과 옥상에서 각 17.3 Pa가 된다. 또한 이 계단실에서 잔여차압이 남지 않는 한계유속은 식(12)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$v_r = \left\{ \frac{2 \times 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) D_h}{f \rho} \right\}^{1/2} \quad (16)$$

$$= \left\{ \frac{2 \times 3460 \left( \frac{1}{293.15} - \frac{1}{263.15} \right) \times 3.53}{32 \times 1.2} \right\}^{1/2}$$

$$\approx 0.5 [m/s]$$

이 경우 계단실에서 유량  $Q_r = 0.5 \text{ m/s} \times 15 \text{ m}^2 = 7.5 \text{ m}^3/\text{s}$  정도의 상향 자연기류를 발생시키면 계단실내에 연돌효과에 의해 차압 불균형은 해소된다. 피난이 시작되지 아니하여 계단실로 통하는 모든 층의 출입문이 닫혀있는 경우에는 1층에서  $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 공급하고 최상층에서 외부로 통하는 벤트 혹은 출입문이 적당한 크기로 열려 있으면 계단실 전체적으로 균일한 차압을 조성할 수 있다. 식(13)에서  $c$ 값으로 0.82를 적용하면, 개구면적은 다음과 같이 된다.

$$A_t = \frac{Q_r}{c\sqrt{\Delta p_n}} = \frac{7.5}{0.82\sqrt{50}} \approx 1.3 \text{ m}^2 \quad (17)$$

( $\Delta p_n = 50 \text{ Pa}$ 인 경우)

$$A_t = \frac{Q_r}{c\sqrt{\Delta p_n}} = \frac{7.5}{0.82\sqrt{30}} \approx 1.7 \text{ m}^2 \quad (18)$$

( $\Delta p_n = 30 \text{ Pa}$ 인 경우)

### 3.2.2 한계유량만을 공급하는 경우

겨울철 최상층 화재시 한계유량을 공급하면 차압에는 문제가 없고, 최상층 화재실내로 필요량이 배출되고 남은 것은 계단실 상부 개구부로 배출된다. 그러나 최하층에서 화재가 나서 피난문이 열리고 공기가 층 내 공간으로 배출되면 한계유량보다 적은 유량만이 계단실을 따라 상승하기 때문에 계단실에 연돌효과에 의한 차압구배가 형성된다. 이때 화재층을 지나 상승하는 공기량은 한계공기량에서 예상배출량을 뺀 것이  $5.25 \text{ m}^3/\text{s}$  된다. 이때 유속  $v_u = Q_u/A_s = 5.25/15 = 0.35 \text{ [m/s]}$ 이다. 이것은 한계유속에 미달하므로 연돌효과에 의한 차압의 성장을 충분히 극복하지 못하며, 유속미달로 인해 계단실에 잔존하게 되는 차압의 크기는 식(3)에 의해 다음과 같이 된다.

$$\Delta p_{fe} = f \frac{1}{D_h} \frac{\rho(v_u^2 - v_r^2)}{2} \quad (19)$$

$$= \frac{32}{3.53} \frac{1.2 \times (0.5^2 - 0.35^2)}{2} = 0.69 \text{ (Pa/m)}$$

이 정도의 차압구배로 약 110m를 올라가면 연돌효과에 대한 여유차압  $77 \text{ Pa}$ 이 소진되고, 최대 허용차압  $80 \text{ Pa}$ 에 도달하게 된다. 그러므로 2층에서 불이 나는 경우를 가정하면 연돌효과를 극복할 수

있는 건물 최대 높이는 110m를 조금 넘는 정도이다.

### 3.2.3 한계유량과 배출량을 합하여 공급하는 경우

상층부에서 화재가 발생하는 경우, 계단실의 1층에서 상승시켜야할 유량은 한계유량에 배출량을 합하면  $Q_u = 9.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 되며 유속은  $0.65 \text{ m/s}$ 이다. 이 초과유속으로 발생하는 계단실 단위높이당의 추가유동손실은 식(3)에 의해 다음과 같이 된다.

$$\Delta p_{fe} = f \frac{1}{D_h} \frac{\rho(v_u^2 - v_r^2)}{2} \quad (20)$$

$$= \frac{32}{3.53} \frac{1.2 \times (0.65^2 - 0.5^2)}{2}$$

$$= 0.94 \text{ (Pa/m)}$$

이 정도의 마찰손실로서  $77 \text{ Pa}$ 의 차압을 발생시키는 최대 거리는 약 82m이다. 즉, 예상 화재 발생 층의 높이가 82m을 넘으면 1층에서  $80 \text{ Pa}$ 을 초과하는 과압으로 공급하여야 하므로 제연시스템을 정상 운용할 수 없게 된다.

### 3.2.4 상기 두 경우의 중간 유량을 공급하는 경우

한계유속, 배출 전 유속, 배출 후 유속을 각각  $v_r$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ , 배출점까지의 높이와 배출점으로부터 계단실 상부까지의 높이를 각각  $h_1$ ,  $h_2$ 라 하면, 다음 관계가 성립된다. 배출 전에는 배출점까지의 마찰손실이 연돌효과에 의한 차압을 극복하는 것보다  $77 \text{ Pa}$ 만큼 더 큰 것이 허용되므로 하기 식은 식(3)과 식(1)의 차이로 다음과 같다.

$$f \frac{h_1}{D_h} \frac{\rho v_1^2}{2} - 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) h_1 = 77 \text{ Pa} \quad (21)$$

$$h_1 = 77 / \left\{ f \frac{\rho v_1^2}{2 D_h} - 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) \right\}$$

이다. 배출 후에는 한계유속보다 적은 유속 때문에 연돌효과가 유동마찰을 압도하게 되고, 그 차이는  $77 \text{ Pa}$ 까지 허용되므로 반대의 경우로 식(1)과 식(3)의 차이로 나타낸다.

$$3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) h_2 - f \frac{h_2}{D_h} \frac{\rho v_2^2}{2} = 77 \text{ Pa} \quad (22)$$

$$h_2 = 77 / \left\{ 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) - f \frac{\rho v_2^2}{2D_h} \right\}$$

이다. 또한, 식(14)에서 구한 배출량과 계단실 단면적을 고려하면 배출 전후의 유속들은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$v_2 = v_1 - \frac{Q_D}{A_s} = v_1 - \frac{2.25}{15} = v_1 - 0.15 \quad (23)$$

위에서  $h_1$ 은 최상층 화재시의 한계높이이고,  $h_2$ 는 최하층 화재시의 한계높이이므로, 두 높이가 같아지는 점이 실용상 채택 가능한 최대높이가 된다. 즉, 한계높이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h_{\max} &= 77 / \left\{ f \frac{\rho v_1^2}{2D_h} - 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) \right\} \quad (24) \\ &= 77 / \left\{ 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) - f \frac{\rho v_2^2}{2D_h} \right\} \end{aligned}$$

상기 설계조건을 위의 식(24)에 적용하고 정리하면 다음과 같이 된다.

$$5.44v_1^2 - 1.35 = 1.35 - 5.44(v_1 - 0.15)^2 \quad (24)'$$

위의 조건을 만족하는  $v_1$ 를 구하면 0.566 m/s이고, 이때의 최대높이는 약 190 m이다.

### 3.3 여름철의 경우

여름철엔 역연돌효과가 일어날 수 있다. 실제로는 냉방운전이 정지된 상태에서 급기가압이 시작되면 내외기 온도차이가 급격히 해소되어 연돌효과가 거의 일어나지 않는다. 그러나 높이의 한계를 구하기 위해 여름철 계단실과 외기의 온도를 각각 298 K, 308 K로 유지되는 것으로 보고 앞에서 계산한 계단실 높이 190 m에 대해 차압을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta p_{so} &= 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) h \quad (25) \\ &= 3460 \times \left( \frac{1}{308} - \frac{1}{298} \right) \times 190 = -72 Pa \end{aligned}$$

즉, 190 m를 올라가면서 차압이 계단실의 바다

보다 72 Pa만큼 낮아진다. 이 경우 계단실 하부의 차압을 80 Pa 정도로 억제하면서 최상층 계단실의 차압을 3 Pa로 유지하기 위해서는 계단실 상향 유동마찰손실로 5 Pa만을 허용할 수 있다.

이 정도의 마찰손실을 유발하는 유속을 식(4)로 구하면 0.07 m/s이다. 이것은 1.04 m<sup>3</sup>/s의 풍량으로 열린문 면적 1.5 m<sup>2</sup>에서 0.7 m/s의 풍속이 되므로 EN12101-6의 권장방연풍속에 미달한다. 따라서 이 정도의 풍량으로는 화재층에서 방연기능을 발휘할 수가 없다. 높이를 조금 낮추어 180 m일 때의 허용유량을 다시 구해보면 1.4 m<sup>3</sup>/s의 풍량으로서 열린문 면적 1.5 m<sup>2</sup>에서 0.93 m/s의 풍속이 되므로 EN12101-6의 권장방연풍속을 충족한다. 그러므로 이 경우의 한계높이는 180 m 정도로 볼 수 있다.

### 3.4 차압 조절

공급유량이 일정하여도 기온이 변함에 따라 계단실 내의 차압분포는 현격히 달라진다. 그러나 건물 내외의 기온차에 따라 송풍기의 용량을 적절히 변화시켜 미세차압분포를 적정 수준으로 유지하는 데는 어렵고 까다로운 조치가 필요하다. 그러므로 시스템의 안전성을 위해서는 겨울철에 대해서 계산한 최대 풍량을 외기온도에 관계없이 계단실 하부에서 공급하는 것이 불가피하다.

계단실 내의 온도가 상대적으로 높아질수록 한계유량 이상의 유량이 유동하는 경우에는 상부로 올라갈수록 차압은 상대적으로 작아진다. 그러므로, 계단실 바닥에서 설계 경계조건인 80 Pa를 넘지 않도록 하면 한계높이 이내의 다른 부분에서는 과압의 문제가 발생하지 않는다.

## 4. 초고층 건축물의 제연대책

계단실 단독가압으로는 180 m 정도의 한계높이를 넘어설 없다는 결과를 얻었다. 부속실을 균일하게 가압하여도 계단실에 강력한 연돌효과가 발생하여 계단실과 부속실 사이의 출입문 안팎에 작용하는 차압의 편차가 층별로 크게 나타난다. 그러므로 계단실과 부속실을 동시에 가압하는 방식이 유효할 것으로 보인다. 후반기에는 한계유량만을 계단실 하부에서 공급하여 상승 유동시키고, 방연풍량은 부속실에서 공급토록 하면 계단실 높이에 관계없이 연돌효과를 극복할 수 있다.

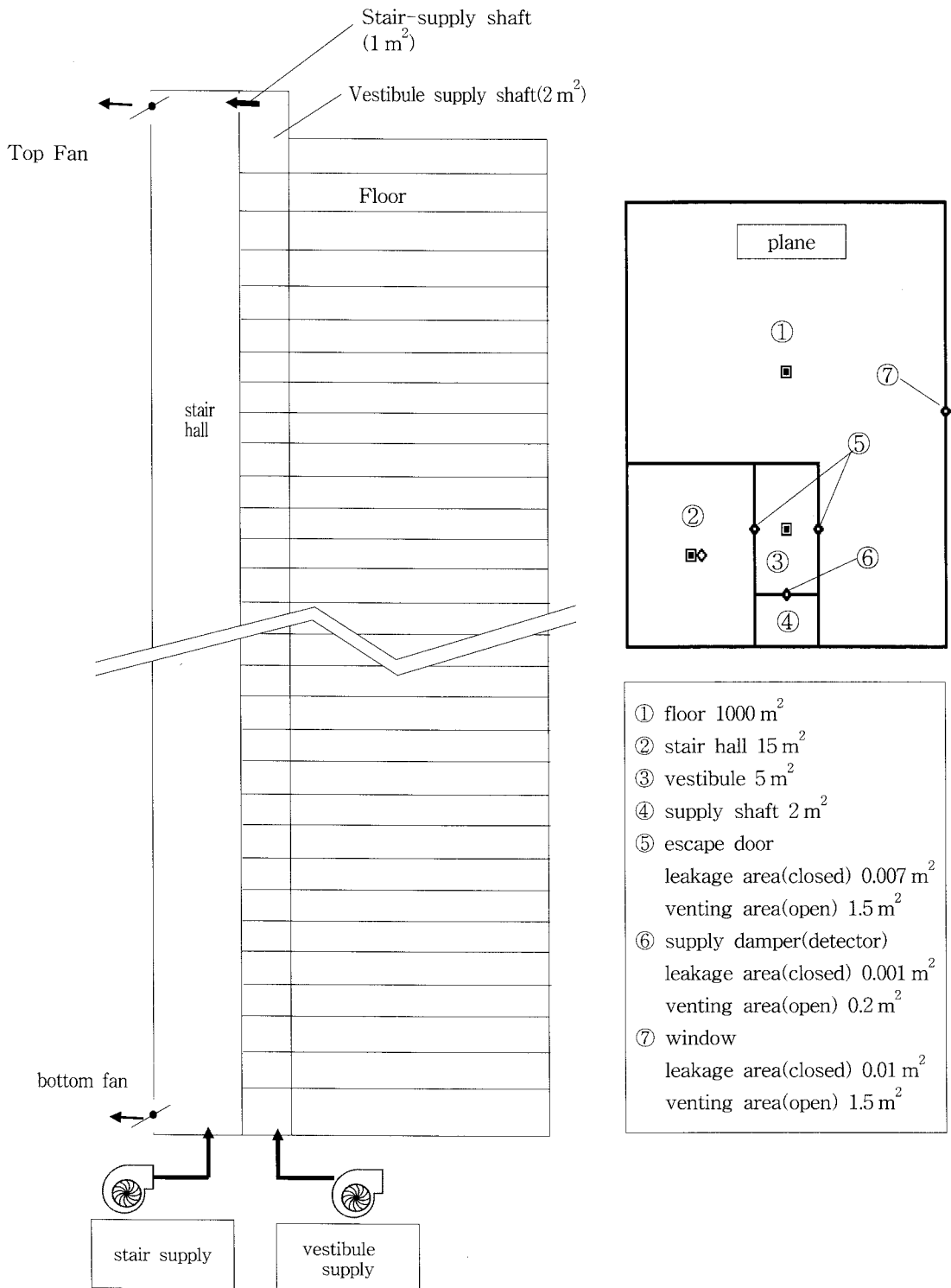


Fig. 1 An outline of simulation building.

Table 1 Outdoor temperature 35 °C, Indoor temperature 25 °C, Non fire(All door closed)-Summer

Level	Outside-stair hall	Stair hall-vestibule	Vestibule-compartment	Effective differential pressure	Outside vent
Rooftop	70.9 < 2.066 (Vent open)	Stair hall-supply shaft 78.0 < 6.773			35.8 > 0.023
		35.2 > 0.023			
100		19.6 > 0.017	40.7 > 0.025	60.3 Pa >	
90		16.9 > 0.016	39.5 > 0.024	56.4 Pa >	
80		14.8 > 0.015	38.7 > 0.024	53.5 Pa >	
70		13.2 > 0.014	38.3 > 0.024	51.5 Pa >	
60		12.0 > 0.013	38.4 > 0.024	50.4 Pa >	
50		11.3 > 0.013	39.0 > 0.024	50.3 Pa >	
40		10.8 > 0.013	39.9 > 0.024	50.7 Pa >	
30		10.6 > 0.013	41.4 > 0.025	52.0 Pa >	
20		10.7 > 0.013	43.2 > 0.025	53.9 Pa >	
10		11.2 > 0.013	45.9 > 0.026	57.1 Pa >	
2		12.0 > 0.013	48.8 > 0.027	60.8 Pa >	
1	73.5 < 15.779 (Vent open)	11.9 > 0.013	49.6 > 0.027	61.5 Pa >	12.4 > 0.027

Table 2 Outdoor temperature 35 °C, Indoor temperature 25 °C, Fire on the third floor(The first and third floor evacuation doors open)-Summer

Level	Outside-stair hall	Stair hall-vestibule	Vestibule-compartment	Effective differential pressure	Outside vent
Rooftop	63.4 < 0.006 (Vent closed)	Stair hall-supply shaft 37.0 < 4.663			32.0 > 0.022
		31.5 > 0.022			
100		19.5 > 0.017	34.8 > 0.023	54.3 Pa >	
90		16.8 > 0.016	33.8 > 0.023	56.4 Pa >	
80		14.8 > 0.015	33.2 > 0.022	53.5 Pa >	
70		13.4 > 0.014	33.1 > 0.022	51.5 Pa >	
60		12.4 > 0.014	33.3 > 0.022	50.4 Pa >	
50		11.8 > 0.013	34.0 > 0.023	50.3 Pa >	
40		11.5 > 0.013	35.1 > 0.023	50.7 Pa >	
30		11.5 > 0.013	36.7 > 0.023	52.0 Pa >	
20		11.8 > 0.013	38.6 > 0.024	53.9 Pa >	
10		12.6 > 0.014	41.4 > 0.025	57.1 Pa >	
3 (Fire)		11.5 > 3.919 Door open 2.71 m/s	28.7 > 6.233 Door open 4.16 m/s	40.2 Pa >	28.5 > 6.233 Vent open
2		14.0 > 0.014	45.0 > 0.026	60.8 Pa >	
1	71.7 < 6.167 (Vent open)	23.9 > 5.639 Door open	24.0 > 5.650 Door open	61.5 Pa >	23.8 > 5.650



Table 3 Outdoor temperature 35 °C, Indoor temperature 25 °C, Fire on the 50th floor(The first and 50th floor evacuation doors open)-Summer

Level	Outside-stair hall	Stair hall-vestibule	Vestibule-compart ment	Effective differential pressure	Outside vent
Rooftop	49.7 < 0.005 (Vent closed)	Stair hall-supply shaft 42.0 < 4.970			25.1 > 0.019
		24.7 > 0.019			
100		14.3 > 0.015	27.8 > 0.020	42.1 Pa >	
90		10.8 > 0.013	25.4 > 0.020	36.2 Pa >	
80		8.1 > 0.011	23.2 > 0.019	31.3 Pa >	
70		5.9 > 0.009	21.2 > 0.018	27.1 Pa >	
60		4.2 > 0.008	19.5 > 0.017	23.7 Pa >	
50 (Fire)		2.7 > 1.924 Door open 1.28 m/s	11.2 > 3.898 Door open 2.60 m/s	13.9 Pa >	11.3 > 3.898 Vent open
40		4.7 > 0.008	23.2 > 0.019	27.9 Pa >	
30		6.6 > 0.010	28.6 > 0.021	35.2 Pa >	
20		8.8 > 0.011	34.2 > 0.023	43.0 Pa >	
10		11.3 > 0.013	40.4 > 0.025	51.7 Pa >	
2		13.7 > 0.014	46.0 > 0.026	59.7 Pa >	
1	71.7 < 6.167 (Vent open)	23.9 > 5.639 Door open	24.0 > 5.650 Door open	47.9 Pa >	23.8 > 5.650

Table 4 Outdoor temperature 35 °C, Indoor temperature 25 °C, Fire on the 97th floor(The first and 97th floor evacuation doors open)-Summer

Level	Outside-stair hall	Stair hall-vestibule	Vestibule-compar tment	Effective differential pressure	Outside vent
Rooftop	24.7 < 0.004 (Vent closed)	Stair hall-supply shaft 54.1 < 5.638			12.5 > 0.013
		12.3 > 0.013			
100		5.2 > 0.087	14.6 > 0.015	19.8 Pa >	
97 (Fire)		3.1 > 2.042 Door open 1.36 m/s	8.2 > 3.333 Door open 2.22 m/s	11.3 Pa >	8.3 > 3.333 Vent open
90		3.9 > 0.008	14.3 > 0.015	18.2 Pa >	
80		4.3 > 0.008	16.6 > 0.016	20.9 Pa >	
70		4.8 > 0.008	19.3 > 0.017	24.1 Pa >	
60		5.5 > 0.009	22.2 > 0.018	27.7 Pa >	
50		6.4 > 0.010	25.3 > 0.020	31.7 Pa >	
40		7.4 > 0.010	28.8 > 0.021	36.2 Pa >	
30		8.5 > 0.011	32.6 > 0.022	41.1 Pa >	
20		9.8 > 0.012	36.7 > 0.023	46.5 Pa >	
10		11.5 > 0.013	41.5 > 0.025	53.0 Pa >	
2		13.3 > 0.014	46.1 > 0.026	59.4 Pa >	
1	71.7 < 9.418 (Vent open)	23.9 > 5.642 Door open	24.0 > 5.654 Door open	47.9 Pa >	24.1 > 5.654

Table 5 Outdoor temperature  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Indoor temperature  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Non fire(All door closed)-Winter

Level	Outside-stair hall	Stair hall-vestibule	Vestibule-compart ment	Effective differential pressure	Outside vent
Rooftop	69.6 < 14.834 (Vent open)	Stair hall-supply shaft 108.5 < 8.056			34.6 > 0.023
		34.6 > 0.023			
100		17.3 > 0.016	40.7 > 0.025	60.3 Pa >	
90		15.7 > 0.015	34.8 > 0.023	56.4 Pa >	
80		14.9 > 0.015	29.8 > 0.021	53.5 Pa >	
70		15.0 > 0.015	25.3 > 0.019	51.5 Pa >	
60		17.3 > 0.016	20.6 > 0.018	50.4 Pa >	
50		23.3 > 0.019	14.6 > 0.015	50.3 Pa >	
40		26.2 > 0.020	12.9 > 0.014	50.7 Pa >	
30		30.1 > 0.021	12.5 > 0.014	52.0 Pa >	
20		35.3 > 0.023	13.3 > 0.014	53.9 Pa >	
10		42.3 > 0.025	15.1 > 0.015	57.1 Pa >	
2		49.4 > 0.027	17.4 > 0.016	60.8 Pa >	
1	72.5 < 3.753 (Vent open)	49.8 > 0.027	17.4 > 0.016	Pa >	4.3 > 0.016

Table 6 Outdoor temperature  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Indoor temperature  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Fire on the third floor(The first and third floor evacuation doors open)-Winter

Level	Outside-stair hall	Stair hall-vestibule	Vestibule-compar tment	Effective differential pressure	Outside vent
Rooftop	76.8 < 15.586 (Vent open)	Stair hall-supply shaft 37.0 < 4.663			38.2 > 0.024
		38.2 > 0.024			
100		18.0 > 0.016	45.6 > 0.026	63.6 Pa >	
90		14.7 > 0.015	37.7 > 0.024	52.4 Pa >	
80		11.9 > 0.013	30.7 > 0.021	42.6 Pa >	
70		9.6 > 0.012	24.5 > 0.019	34.1 Pa >	
60		7.9 > 0.011	19.0 > 0.017	26.9 Pa >	
50		6.6 > 0.010	14.0 > 0.015	20.6 Pa >	
40		6.2 > 0.010	9.4 > 0.012	15.6 Pa >	
30		7.9 > 0.011	4.0 > 0.008	11.9 Pa >	
20		7.0 > 0.010	1.7 > 0.005	8.7 Pa >	
10		6.0 > 0.010	0.5 > 0.003	6.5 Pa >	
3 (Fire)		4.7 > 2.512 Door open 1.67 m/s	0.7 > 0.965 Door open 0.64 m/s	5.4 Pa >	0.3 > 0.965 Vent open
2		8.3 > 0.011	0.7 > 0.003	9.0 Pa >	
1	12.6 < 0.003 (Vent closed)	4.2 > 2.391 Door open	4.2 > 2.383 Door open	8.4 Pa >	3.2 > 2.383

Table 7 Outdoor temperature -10 °C, Indoor temperature 20 °C, Fire on the 50th floor(The first and 50th floor evacuation doors open)-Winter

Level	Outside-stair hall	Stair hall-vestibule	Vestibule-compart ment	Effective differential pressure	Outside vent
Rooftop	70.7 < 14.309 (Vent open)	Stair hall-supply shaft 111.3 < 8.158			35.2 > 0.023
		35.2 > 0.023			
100		17.3 > 0.016	41.1 > 0.025	58.4 Pa >	
90		13.1 > 0.014	31.8 > 0.022	44.9 Pa >	
80		9.4 > 0.012	23.2 > 0.019	32.6 Pa >	
70		6.2 > 0.010	15.3 > 0.015	21.5 Pa >	
60		3.3 > 0.007	7.9 > 0.011	11.2 Pa >	
50 (Fire)		1.0 > 1.184 Door open 0.79 m/s	0.7 > 0.964 Door open 0.64 m/s	1.7 Pa >	0.7 > 0.964 Vent open
40		4.7 > 0.008	0.8 > 0.004	5.5 Pa >	
30		8.7 > 0.011	1.5 > 0.005	10.2 Pa >	
20		13.7 > 0.014	2.5 > 0.006	16.2 Pa >	
10		20.1 > 0.017	4.1 > 0.008	24.2 Pa >	
2		4.1 > 0.008	5.8 > 0.009	9.9 Pa >	
1	34.5 < 0.005 (Vent closed)	11.6 > 3.956 Door open	11.5 > 3.945 Door open	23.1 Pa >	11.4 > 3.945

Table 8 Outdoor temperature -10 °C, Indoor temperature 20 °C, Fire on the 97th floor(The first and 97th floor evacuation doors open)-Winter

Level	Outside-stair hall	Stair hall-vestibule	Vestibule-compar tment	Effective differential pressure	Outside vent
Rooftop	71.6 < 9.489 (Vent open)	Stair hall-supply shaft 75.8 < 6.733			35.6 > 0.023
		35.6 > 0.023			
100		18.4 > 0.017	38.9 > 0.024	19.8 Pa >	
97 (Fire)		11.6 > 3.963 Door open 2.64 m/s	21.7 > 5.422 Door open 3.61 m/s	11.3 Pa >	21.5 > 5.422 Vent open
90		12.9 > 0.014	27.9 > 0.020	18.2 Pa >	
80		11.7 > 0.013	22.2 > 0.018	20.9 Pa >	
70		11.6 > 0.013	17.0 > 0.016	24.1 Pa >	
60		15.3 > 0.015	10.0 > 0.012	27.7 Pa >	
50		15.9 > 0.015	6.9 > 0.010	31.7 Pa >	
40		16.6 > 0.016	5.2 > 0.009	36.2 Pa >	
30		18.1 > 0.017	4.5 > 0.008	41.1 Pa >	
20		20.9 > 0.018	4.4 > 0.008	46.5 Pa >	
10		25.2 > 0.019	5.1 > 0.009	53.0 Pa >	
2		29.8 > 0.021	6.2 > 0.010	59.4 Pa >	
1	38.2 < 0.005 (Vent closed)	12.8 > 4.166 Door open	12.7 > 4.154 Door open	47.9 Pa >	11.7 > 4.154

다만 흡서기에는 역연돌효과 때문에 역방향의 유동이 필요하며 역연돌효과를 상쇄할 수 있는 역방향 유동의 한계유량은 식(12)로부터 구할 수 있는데, 외부 기온이 308 K이고 계단실 내 온도가 298 K인 흡서기 조건에서 계단실에 대해 한계유량을 구해보면 약  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 최상층 계단실 차압이 음의 크기가 되지만 양이면 계단실 모든 부분에 양의 차압이 형성되어 제연기능에 문제가 없게 되므로, 계단실 정상부에서 외기를 충분히 공급함으로써 계단실 전체적으로 차압문제를 해결할 수 있다. 역방향유동을 위한 공기를 건물 하부로부터 취할 수 있는 한 가지 가능한 방법은 부속실 급기 샤프트의 정상 말단부분과 계단실을 닥트 또는 개구로 연결하는 것이다. 그리고 계단실 바닥과 꼭대기 부분에 압력반응형 자동조절 벤트를 설치하여 과압을 배출토록 한다. 흡환기에 계단실 상부의 압력이 규정 차압보다 높으면 급기샤프트로부터 공급되는 공기가 계단실 상부에 있는 벤트로 배출되고, 여름철 계단실 상부의 압력이 낮으면 급기샤프트로부터 공급되는 공기가 계단실을 거슬러 내려가면서 역연돌효과를 극복하게 된다. 시뮬레이션을 위한 건물의 개략도는 Fig. 1과 같으며 사용 Tool은 미국의 NIST에서 개발한 CONTAMW2.4C를 이용하였다. 본 시뮬레이션 결과 계단실과 부속실을 동시에 가압한 경우 한계높이 360 m까지 가능한 것으로 나타났다. 시뮬레이션 결과는 Table 1부터 Table 8까지에 나타내었으며 대체로 무난한 결과를 얻었으나, 다음과 같은 요인들 때문에 한계높이를 정확히 예측하기가 어려웠다.

- (1) 계단실과 층내 공간 사이의 문틈 누설 때문에 유동 공기량이 변화한다.
- (2) 바닥층과 최상층에 설치하는 압력반응형 자동조절 벤트로 유출되는 공기량을 예측하기 어렵다.
- (3) 예상 화재층의 위치에 따라 유동공기량이 달라진다.

Table에 있는 수치와 기호 중 ‘>’ 또는 ‘<’은 차압의 작용방향을 나타내는 표시이며, 작용방향 표시 앞의 수치는 차압(Pa), 작용방향 표시 뒤의 수치는 풍량( $\text{m}^3/\text{s}$ )이다. 계단실의 바닥과 꼭대기에 압력반응형 벤트를 설치하여 70 Pa 정도를 초과할

때에만 배출하는 것으로 하였다.

## 5. 결 론

고층건물의 가압제연시스템의 성능개선을 위한 계단실 연돌효과 해소대책 및 제연구역 가압방식에 대한 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 계단실 하부급기와 상향유동을 이용하여 흡환기 연돌효과를 극복할 수 있다. 한계높이 이하에서는 계단실 단독급기만으로도 제연효과를 달성할 수 있으며, 제어시스템이 필요 없는 극히 단순한 시스템만으로도 가능하다.

(2) 한계높이 이상의 초고층 계단실에서는 계단실과 부속실을 동시에 가압함으로써 효과적인 피난 경로 확보가 가능하다. 계단실의 정상부와 부속실 급기 샤프트의 정상부를 연결함으로써 역연돌효과까지도 해소할 수 있다.

(3) 계단실 바닥과 정상부에 과압배출을 위한 댐퍼가 필요하며 댐퍼는 설정된 압력범위에서 한계유량 전부를 배출할 수 있는 크기와 구조이어야 한다.

(4) 계단실은 온도조건에 따라 팬의 부하가 달라지며, 부속실 급기 샤프트는 문이 열리는 위치에 따라 닥트의 마찰조건이 달라져 팬의 부하가 변하게 되므로, 두 팬은 별도로 설치하여 운영하여야 한다.

## 후 기

본 논문은 2009년도 경원대학교의 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

## 참고문헌

1. NFPA 92A, 2006, National Fire Protection Association, Quincy, MA.
2. BS EN 12101-6, 2005, British Standard.
3. NFSC 501A, 2008, Korea National Emergency Management Agency.
4. AS/NZS1668.1, 1998, Australian/New Zealand Standard.
5. Achakji, G. Y. and Tamura, G. T., 1988, Pressure drop characteristics of typical stairshafts in high-rise building, ASHRAE Transaction, Vol. 94, Pt 1, pp. 1223-1237.