

D-6

고층 건축물 피난경로의 연돌효과 저감 방안 Stack Effect Mitigation Methods in Exit Route of High-rise Building

김진수*
Jin-Soo Kim

벽산엔지니어링(주)

요 약

건물 높이에 비례하여 피난계단의 길이가 증가하면서 피난 인원부하도 함께 늘어나기 때문에 피난 시간은 건물 높이에 제곱비례하는 것으로 볼 수 있다. 연기의 수직전파가 신속한데 비하여 피난 속도는 너무나 늦기 때문에 수직피난로의 안전을 위한 대책이 절실하다. 현존하는 수직피난경로의 급기압식 제연시스템은 옹환기에 연돌효과에 의해 기능이 현저히 제한을 받게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 계단실을 외부로 개방하거나 계단실과 외부 사이의 공기 소통을 자유롭게 함으로써 옹환기 연돌효과를 극복할 수 있다.

ABSTRACT

Length of staircase get longer and evacuation load get heavier in proportion to the building height. Therefore evacuation time could be considered proportional to square of building height. While smoke spreads vertically so rapidly, evacuation speed is too slow, therefore the reasonable measure for the safe of egress route is urgent. Existing pressurizing smoke control system of vertical exit route is seriously limited in function under the stack effect in winter. Stack effect in winter could be overcome with the methods of opening the staircase outward or letting airflow be free between staircase and outside.

Keywords : Stack effect(연돌효과), Overpressure exhaust(과압배출), Flow friction loss(유동마찰손실), Critical flow(한계유동), Staircase Vent opening(계단실 개구 개방)

1. 서 론

초고층 건축물이 많아짐에 따라 그 화재 안전 문제는 초미의 관심사가 되었다. 911 테러사건 처럼 특수한 경우가 아니면 건축물의 구조가 취약하여 인명에 위해가 된 적은 없었다. 그러나 피난은 여전히 해결하기 어려운 난제이다.

1993년 2월 26일의 뉴욕 WTC 테러사건에서는 12시18분에 지하2층 주차장에서 폭발이 있는 후 불과 5분 만에 79~82층의 일본계 은행에 연기가 침입한 것이 보고되었고(12:23), 95,96층 은행은 27분 만에 연기에 의해 시계가 10m

로 저하되었으며(12:45), 일본기업의 잔류자 전원이 지상에 도달한 것은 17시경으로 처음 폭발이 발생한 후 거의 다섯 시간이 지난 후였다고 한다.¹⁾

2003년 10월 17일 오후 미국 시카고에 있는 쿡 카운티(Cook County) 청사에서 발생한 화재의 경우에도, 평시근무인원의 1/8만이 근무한 주말 오후 환경에서 최고층인 33층의 인원이 최종 피난하는데 25분이 걸렸다고 보고되었다.²⁾ 이것은 정상인원이 거주하는 초고층건물에서의 피난 시간은 아무리 효과적인 피난시스템을 운영하더라도 최소 두 시간 이상 걸릴 것임을 시사한다.

한편 2009년 10월 27일 저녁 서울 강남 파이낸스센터 지하 1층 음식점 주방에서 발생한 화재는 불과 8분 만에 진화된 소규모 사고였으나

* E-Mail : kimjs@bseng.co.kr

불과 5분 만에 각 승강기 그룹(고층부, 저층부)의 최상층인 18층과 42층에 연기가 침입하여 큰 혼란을 겪었다. 연기의 수직전파가 신속한데 비하여 피난 속도는 너무나 늦기 때문에 수직피난로의 안전을 위한 대책이 절실하다.

2. 초고층 건축물 피난경로

2.1 초고층 피난 수단의 유의점

초고층 건축물 역시 일반 건축물과 마찬가지로 피난수단은 계단과 승강기를 이용할 수밖에 없다. 피난시간은 피난계단의 길이와 피난인원부하에 각기 비례한다. 따라서 건물 높이에 비례하여 피난계단의 길이가 증가하면서 피난 인원부하도 함께 늘어나기 때문에 피난시간은 건물 높이에 제곱비례하는 것으로 볼 수 있다. 그에 더하여 초고층이 주는 심적 부담과 장거리 피난보행에 따른 피로감 등을 고려하면 실제적인 피난시간의 예측은 대단히 어려워진다.

그러므로 초고층 피난수단에 대해서는 다음 사항을 고려할 필요가 있다.

- 1) 수직피난경로는 연기로부터 철저히 보호되어야 한다. 이러한 보호는 소방대의 소화활동까지 고려하여 장시간 지속되어야 한다.
- 2) 출입문의 조작, 계단경사, 기류 등 피난과정에서 만나게 되는 모든 요소는 평소보다 편한 감각 범위 내에 있어서 피난자의 강박감을 덜어주어야 한다.
- 3) 계단실만으로는 피난부하를 감당하기 어려우므로 승강기를 피난용으로 사용할 수 있는 시스템으로 구축하여야 한다.
- 4) 피난용으로 사용하는 것 외에도, 가장 유력한 연기의 수직전파통로인 승강기 승강로는 철저히 방호되어야 한다.

2.2 초고층 피난 수단에 작용하는 연돌효과

고층건축물의 수직피난경로를 연기로부터 방호하기 위하여 적용하는 제연시스템으로는 급기가압을 이용하는 차압제연방식이 보편적이다.

그러나 중위도 이상의 온한대 기후에서 초고층의 급기가압성능을 예측하기 어렵게 만드는 가장 큰 요인은 연돌효과이다. 연돌효과는 원리적으로 높이와 건물내외부의 온도차에 정확히 비례하지만, 그로 인한 차압분포는 각 층의 피난문 누설 정도에 따라 다르고 샤프트의 외부 개구부 개폐 상황에 따라 달라지므로, 정성적 분석은 어렵지만 정량적 대처는 어려워져, 아직 뚜렷한 극복방식은 정립된 것이 없다.

여름철에는 냉방운전에 의해 실내온도가 옥외온도보다 낮아져서 연돌효과가 발생할 수 있지만, 중위도 이상의 지역에서는 건물 내외의 온도차가

그리 크지 않고, 화재로 인하여 냉방운전 정지와 함께 가압을 위하여 외부 공기가 도입되면 건물 내외 온도차는 곧바로 해소되어 연돌효과는 미미해진다.

그러나 겨울철에는 여름철과 달리 건물 내외부의 온도차가 크고, 냉방운전이 정지되어도 화재 그 자체로써 건물내부 온도를 높일 수 있으며, 또한 차가운 외부공기가 도입되어도 건물의 샤프트를 상승하는 동안 구조체 축열 때문에 온도가 상승하여 정상적 실내 온도에 근접하는 것이 여러 차례의 실험에서 확인되었다.

일반적으로 수직 샤프트에서 나타나는 연돌효과에 의한 압력차이는 다음 식과 같이 나타낸다.

$$\Delta P = 3460 \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) h$$

이 식에서 T_o , T_i , h 는 각각 외기온도(K), 샤프트 내부 기온, 샤프트 높이(m)이다.

위 식에 의하면 혹한기 조건(실내기온 20℃, 옥외기온 -10℃)에서 높이 300m의 건물에 발생하는 연돌효과에 의한 차압은 최상부와 최하부 사이에 약 405Pa의 차이가 난다.

건물 외피의 구조가 치밀하여 열드래프트계수가 1/3 이하로 되는 경우에도 건물 상하부 사이에는 계단실 출입문에 작용하는 압력이 120Pa 이상 차이가 난다고 볼 수 있는데, 이 정도의 차이에서 현존 방식의 차압제연방식은 거의 그 기능을 발휘할 수가 없다.

일반적으로 NFPA나 BS/EN Codes에서는 계단실 가압을 권장하고 있으나, 계단실은 연돌효과가 가장 크게 나타나는 구역으로서 혹한기 연돌효과 하에서 계단실 가압은 고층부에 치명적 과압을 야기할 수 있다는 문제가 있다.

계단실과 부속실을 동시에 가압하는 방법도 계단실의 연돌효과를 해소하지 않는 한 안전한 해결책이 되지 못한다.

2.3 기존 급기가압의 문제점

1) 부속실 가압방식의 문제점

특별피난계단의 부속실은 계단실을 열과 연기로부터 보호하기 위한 완충공간이기 때문에 이 공간에서 연기를 차단하는 것이 원리상 가장 좋다. 그러나 국내의 기존 부속실 가압 방식에서는 다음과 같은 문제점이 나타나고 있다.

가. 부속실 과압발생

부속실의 급기는 자동식 댐퍼를 이용하여 제어하고 있지만 그 밀폐기능이 치밀하지 못하여 어느 정도의 누설이 불가피한 반면, 피난문의 정밀도는 표준을 상회하여 누설이 극소하므로 부속실에 과압이 발생한다. 또한 자동식 댐퍼를 이용하지 않고 고전적 형태의 개방형 댐퍼를 이용하는

경우에는 급기덕트 내부 압력이 부속실 필요압력보다 월등히 높으므로 부속실 과압발생은 필연적이다.

나. 부속실 차압부족

위의 경우와 달리 부속실 마감이 치밀하지 못하여 차압이 부족한 경우도 있다. 이것은 최근 건물 내장이 고급화하면서 부속실 벽을 석재 마감하는 경우에 흔히 발생한다. 부속실 벽을 모르타르 미장 마감하는 경우에는 미관 때문에 문틀 주변을 꼼꼼히 사출 처리하지만, 석재로 마감하는 경우에는 문틀과 콘크리트 내벽의 연결 부분이 마감석재 안으로 숨겨지기 때문에 사출처리를 하지 않고, 마감 석재 또한 이음매 실링처리를 하지 않아 상당히 큰 누설 요인이 되므로, 이러한 누설 때문에 부속실에 적정 차압이 형성되지 않는 경우가 많다.

다. 연돌효과

부속실에 기능적 차압이 효과적으로 형성된다하여도 계단실에 안정적인 차압이 형성되지 않으면 제연기능은 기대하기 어렵다.

수직 샤프트에 발생하는 연돌효과가 부속실의 차압을 압도하게 되면, 피난을 위해 계단실로 나가는 피난문을 여는 경우 계단실의 차압이 부속실/거실의 압력을 압도하여, 거실 피난문을 열기 어렵게 하거나 거실의 연기를 계단실로 빨아들이는 경우가 있다.

2) 계단실 가압방식의 문제점

NFPA92와 BS/EN12101-6에서는 계단실 가압방식을 지배적 방식으로 기술하고 있으나, 계단실 단독 가압방식은 부속실 가압방식보다 연돌효과에 더 취약하여 다음과 같은 문제점을 안고 있다.

가. 지상층에서 피난문을 열면 저층부의 계단실 가압효과는 급격히 저하된다. 부속실의 완충효과가 없기 때문에 연돌효과가 발생하면 저층부에서는 오히려 연기를 쉽게 빨아들일 수 있다.

나. 초고층 계단실 전체에 양의 차압이 조성되도록 가압하면 계단실 상층부에는 대단히 큰 차압이 조성되어 혹한기에는 피난에 장애가 될 수 있다.

다. 혹한기 고층부 화재시에 화재층에서 피난하기 위해 계단실 문을 열면, 계단실 연돌효과와 가압 때문에 화재층을 가압하게 되어 다른 층으로 연기를 전파시킬 수 있다.

3) 공통적 문제점 : 과압해소

NFPA92A에는 제연구역의 차압을 적정범위로 유지하기 위한 과압해소 방식으로 다음 네 가지를 제시하고 있다

- 조절 가능한 추가 달린 Barometric dampers 이용
- 공기압이나 전기 동력 모터 작동식 댐퍼를 이용
- 지상층(1층)에서 자동 개방식 문이나 배출구를 통하여 계단실 압력을 배출
- 계단실 문이 모두 닫힐 때 과압을 방지하기 위하여 배출 팬을 사용

이러한 해소방식들은 모두 연돌효과에 대응하지 못하며, 연돌효과가 없는 경우에도 다음과 같은 문제점들이 있다.

- Barometric dampers : 댐퍼는 개방도가 커짐에 따라 댐퍼를 여는데 필요한 힘이 급격히 커진다.(Figure 1) 따라서 댐퍼날개의 자중으로만 미세범위의 차압을 조절하기 위해서는 특수한 구조의 배출댐퍼가 필요하다.
- 모터 작동식 댐퍼 : 적정차압을 조성하기 위해 차압의 크기에 따라 댐퍼의 개도를 변경시킬 수 있는 정교한 제어방식이 필요하다. 그러나 이러한 제어방식은 값이 비싸고, 경시 신뢰성 유지를 보장하지 못한다.
- 지상층(1층)에서 자동 개방식 문이나 배출구를 통하여 계단실 압력을 배출하는 것은 댐퍼를 사용하는 경우와 마찬가지로 차압조절이 어렵다.
- 계단실 문이 모두 닫힐 때 과압을 방지하기 위하여 배출 팬을 사용 : 이 방식 또한 적정차압을 유지하기 위해서는 정교한 모터 제어장치가 필요하다.

이러한 문제점들은 적절한 구조의 과압배출 댐퍼를 사용함으로써 해결이 가능하다.

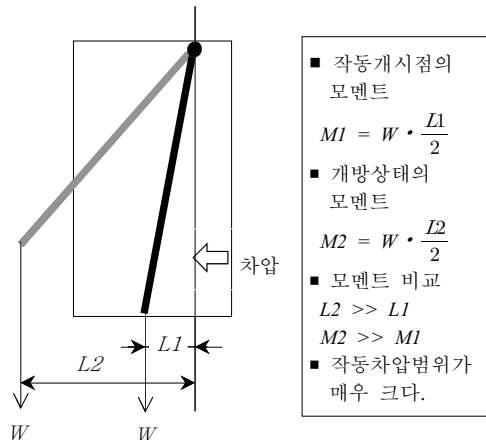


Figure 1. Analysis of Damper opening force.

4) 문제점 해소대책

가. 과압해소 : 고도의 자동제어를 통하여 급기를 제어함으로써 과압 발생의 사전 예방이 가능하기는 하지만, 50-60Pa 범위의 미소 압력을 효과적으로 제어하며 항구적 신뢰성을 기대하기는 어렵다. 예상 최대 누설요인을 고려하여 약간 과잉급기를 하고 신뢰성 있는 기계적 방법으로 과압을 배출하는 것이 최선책이다. Figure 1에서 보는 바와 같이 전통적인 댐퍼구조로서는 어렵지만, 미세차압범위에서 유효한 개방범위를 얻을 수 있는 전용댐퍼를 사용함으로써 해결 가능하다.

나. 부속실 차압부족을 해결하는 유일하고도 확실한 방법은 부속실 벽에 발생할 수 있는 누설요인을 최소화하도록 시공을 꼼꼼히 하는 것이다. 눈에 보이지 않는 누설요인이 없도록 시공 매뉴얼을 확립하여야 한다.

다. 계단실의 연돌효과를 최소한으로 완화하여야 한다. 연돌효과는 수직 샤프트의 어느 수직 좌표상에서 내외부 사이에 발생하는 압력차이가 공기 밀도차이 때문에 수직좌표(건물높이)에 따라 달라지는 것이므로, 공기밀도가 달라지지 않는 한 기계적으로 급기를 제어함으로써 차압분포 그 자체를 변경시킬 수는 없다. 그러므로 계단실을 대폭 개방하여 계단실의 공기밀도를 건물 외부의 공기밀도에 근접시키든가, 계단실에 적절한 기류를 발생시켜 그 마찰손실로써 연돌효과의 영향을 상쇄하는 방법을 이용할 수 있다. 어느 방법이든 기후변화에 영향을 받지 아니하고 기계적 고장 발생 우려가 적으며 성능측정의 신뢰성이 높은 방법을 적용할 필요가 있다.

라. 결론

가장 좋은 방법은 적정량의 급기로 부속실을 가압하되

- 과압을 적절히 배출하고
- 계단실에 연돌효과를 없애는 것이다.

위의 두 가지 문제만 해결할 수 있다면 부속실 가압으로 만족스러운 효과를 얻을 수 있을 것이다. 과압배출은 앞에서 거론한 바대로 효과적인 구조의 과압배출댐퍼를 사용함으로써 간단히 해결할 수 있다.

3. 초고층 계단실의 연돌효과 저감방법

3.1 계단실을 완전 개방하는 방법

피난계단을 전부 옥외계단화 함으로써 연돌효과를 원천적으로 방지하는 방법. 이것은 20층 내외의 건물에서 많이 사용하던 고전적인 방법이지만, 계단실의 평시 이용성능과 단열효과 등의 이유로 최근에는 적용례가 적어지고 있으며, 특히 초고층에서는 강풍의 영향과 심리적인 이유 등으

로 적용하기 어렵다.

3.2 계단실 창문을 개방하는 방법

이것은 계단실에 채광용 창문을 많이(예를 들면 층마다) 만들고 평상시에는 닫아두었다가 화재 시에는 감지기 연동 등의 자동장치를 이용하여 개방하는 방법이다. 개방률이 높으면 계단실과 외기가 균압화되어 연돌효과를 거의 없앨 수 있으나, 초고층 계단실의 개방에 따르는 여러 가지 문제점에 대한 별도의 대책이 필요하여 선불리 제안하기는 어렵다.

3.3 계단실 상하부를 개방하는 방법

계단실 상하부를 계단실 수평단면적과 동일한 면적으로 개방하면 계단실에는 연돌효과에 의한 자연적인 상승기류가 형성된다. 이때의 상승기류는 연돌효과에 의한 차압 때문에 조성되고, 그 차압은 상승기류의 유동마찰손실에 의해 상쇄된다. 즉 유동마찰과 차압이 평형을 이루는 정도의 상승기류가 발생한다. 따라서 연돌효과에 의한 차압은 계단실 유동에 의해 상쇄되므로 부속실 출입문을 포함하는 벽면에는 영향을 미치지 않는다. 이러한 상승기류와 동일한 크기의 상승기류를 인위적으로 형성하면 연돌효과를 상쇄할 수 있다. 계단실에 발생하는 연돌효과를 상쇄할 수 있는 한계유속은 다음 식으로 구할 수 있다.³⁾

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

이 식에서 Δp_f , D_h , f , ρ 는 각각 극복해야할 차압, 계단실의 수력지름, 계단실 기류마찰계수, 기류의 밀도이며, 단위는 SI계 MKS단위이다.

또한 계단실 상승 유속을 알면 그 유속에서 마찰손실과 계단실 상하 개구부에서의 잔여차압은 다음 식으로 판단할 수 있다.

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

위 식 우변의 괄호 안에서 첫 번째 항은 유동마찰손실이고, 두 번째와 세 번째 항이 계단실 하부와 상부의 개구부 잔여 차압이다. 즉

$$\text{바닥층 개구부의 차압 } \Delta p_{st} = \left(\frac{v A_s}{c A_t} \right)^2$$

$$\text{꼭대기층 개구부의 차압 } \Delta p_{sb} = \left(\frac{v A_s}{c A_b} \right)^2$$

이러한 상승기류를 기계적으로 형성하거나 계단실에 대형 개구부를 만들어서 자연적으로 형성하거나 그 효과는 동일하다. 다만 기계적으로 형성하는 경우에는 온도상태에 대응하도록 풍량을 변화시켜야 하는데 그 조작성이 어렵고, 계단실 상하부를 개방하면 자연적으로 평형을 이루게 되므로 별도의 제어가 필요 없다. 또한 화재감지기와 연동하여 상하부의 개구부를 열어두게 되면 피난 상황에 따라 문이 여닫힘으로써 발생하는 압력상태의 변화를 고려할 필요가 없게 된다.

계단실 상하부에 계단실 수평단면적(보통 15㎡ 정도)과 동일한 면적의 대형 개구부를 만드는 것은 대단히 어려운 건축 설계상의 문제가 된다. 그러나 현실적으로 계단실 내 차압을 완전히 상쇄할 필요는 없고, 제연기능 발휘에 문제가 없을 정도의 미소 차압은 허용해도 된다. 계단실내 최상층부와 최하층부에서 ±5Pa 정도의 잔여 차압을 허용한다고 하면 개방부에서 2m/s 이상의 유속을 기대할 수 있다.

여러 측정 결과 계단실에서 발생하는 연돌효과는 약 0.4m/s 내외의 상승기류로써 해소할 수 있는 것으로 조사되고 있다⁴⁾⁵⁾. 이 유속은 계단실 상하부 개구부의 허용 잔여차압 ±5Pa에서 발생하는 풍속 2m/s의 1/5 정도이므로, 계단실 상하부의 개구면적은 계단실 수평단면적의 1/5 정도로써 충분한 기류를 형성할 수 있다. 즉 계단실 수평단면적이 15㎡일 때, 상하부 개구면적은 3㎡ 정도이면 충분하다. 이 정도의 면적은 표준 규격의 양개문 크기보다 작으므로, 실제로 이 정도의 개구부를 건물 계단실에 설치하여 연기감지기 연동으로 개방되도록 하는데 별 문제가 없다.

4. 결론

국내의 혹한기 조건(실내기온 20℃, 옥외기온 -10℃)에서 수평단면적 15㎡ 정도의 표준 크기 계단실 최상부와 바닥층에 외부로 통하는 3㎡ 정도의 개구부(피난문 포함)만 개방하면 연돌효과로 인한 부정적 차압형성을 극복하고 부속실 가압방식의 제연기능을 정상화할 수 있다.

이 방법의 최대 강점은 간단하고 단순하다는 것이다. 이 정도의 개구를 자동으로 개방되도록 함으로써 계단실에 형성되는 연돌효과를 극복할 수 있다면 설계상의 요점은 다음과 같다.

- 부속실의 옥내쪽과 계단실쪽 양쪽의 문을 동시개방하는 것을 고려한 충분한 급기량을 확보한다.
- 과압배출을 위한 플랩댐퍼를 부속실마다 적용한다.
- 부속실 마감을 견실하게 하여 누설요인을 없앤다.

- 재래식 아파트의 경우에는 부속실과 옥내 사이의 균압화를 방지할 수 있도록 옥내 배출을 현실화한다.(아파트 특례조항 배제)
- 부속실 외에 공용복도 또는 승강기승강장이 있는 초고층 아파트의 경우에는 그 공용복도 또는 승강기승강장에서 배출함으로써 정상적 차압조건을 조성할 수 있다.
- 계단실의 최종피난구는 피난층 로비를 통하지 않고 외부로 직접 개방한다.
- 이 방법의 요체는 계단실에 연돌효과에 상응하는 상승유동을 조성하는 것이므로, 바람 때문에 유동장애가 생기지 않도록 상하부 개구부에는 차폐시설을 설치하여야 한다.

참고문헌

- 1) 나카지마 히데오, “건축방재계획을 생각하는 방법·정리하는 방법”, 2005, AFRI
- 2) Guylène Proulx & Irene M. A. Reid, Occupant Behavior and Evacuation during the Chicago Cook County Administration Building Fire, Journal of Fire Protection Engineering. V16. No4, 2006. pp283-309
- 3) 손봉세, 김진수, 고층건축물의 피난경로 가압제연시스템 성능개선대책에 관한 연구, 대한설비공학회는문집 V.21 No.12, 2009. pp703-714
- 4) 제연포럼, “차압을 이용하는 제연설비에 대한 기술지침(안)”, 2008
- 5) G.Y. Achakji & G.T. Tamura, Pressure Drop Characteristics of Typical Stairshafts in High-Rise Buildings, ASHRAE Transactions 1988, V94, pp 1223-1237