[Technical Paper]

굴뚝효과와 외부출입문개방을 고려한 계단실 급기가압제연시스템 제안

김용광

(주)광명토탈엔지니어링 상무이사

Proposal of Air Supply Smoke Control System about Stair-case Considering Stack Effect & Opening of the Outside Door

Yongkwang Kim

Executive Director, Kwangmyeng Total Engineering Co.

(Received September 17, 2020; Revised October 7, 2020; Accepted October 8, 2020)

요 약

국가화재안전기준 NFSC 501A에 의한 고층건축물 특별피난계단제연설비는 대부분이 부속실단독제연으로 시공되어 있어 비상시에 제대로의 역할을 기대하기 어려운 소방시설로 전락해 있다. 25년 전에 급기가압제연개념을 도입하여 탄생한 이 기준은 당시의 열악한 건축 환경에 맞추기 위한 선진국에 없는 우리나라 유일의 부속실단독제연을 창작하였고 이를 주로 적용하여왔다. 그러나 거기에는 근본적인 결함이 있어 입주자가 없는 상태의 준공을 위한 성능 시험은 합격되지만, 입주자가 있는 상황에서는 제대로의 성능이 나오지 않아 무용지물이라는 지탄을 받고 있는 것이다. 저자는 이에 대해 부속실단독제연방법을 지양하고, 가성비가 좋은 굴뚝효과를 경감시키고 계단실 외부출입문 개방을 고려하는 계단실 급기가압제연방법을 제안한다.

ABSTRACT

Most of the special escape staircase smoke control systems for high-rise buildings in accordance with the national fire safety code NFSC 501A are constructed with smoke control only vestibule, making it difficult to expect a proper role in an emergency. This standard, which was created by introducing the concept of air supply pressurized smoke control 25 years ago, created Korea's smoke control only vestibule, which was not found in developed countries, and has been mainly applied to it to fit into the poor architectural environment of the time. However, there is a fundamental flaw there, so the performance test for completion without occupants is passed, but in the presence of occupants, the performance does not come out properly and it is being blamed for being useless. In this regard, the author proposes a method of air supply pressurized smoke control for stair-case that avoid the smoke control method only vestibule, reduces the stack effect with good cost-effectiveness, and considers opening the outside entrance door of the stair-case.

Keywords : Smoke control about stair-case, Reduces the stack effect for stair-case, Consider opening of the outside door at smoke control, Problem of smoke control only vestibule, Air supply pressurized smoke control

1. 서 론

건축물의 피난로 급기가압제연기술은 세계적으로도 1978년에 영국 Fire research station (FRS)에서 관련기술기준을 세계 최초로 발효하였고, 우리나라도 이를 참고하여 1995년 처음으로 급기가압제연의 기술기준을 공포 및 2004년 ‘특별피난계단 및 부속실 제연설비의 화재안전기준(NFSC 501A)’이 제정되었다⁽¹⁾.

영국이 42년, 우리나라가 25년의 역사인 셈이다. 비교적 짧은 역사인 관계 때문인지 아직 현재의 부속실제연설비 기술에는 개선의 여지가 있다. 기준 제정 당시의 열악한 건축 환경에 맞추기 위한 선진국에 없는 우리나라 유일의 부속실단독제연을 창작하여 제연방법으로 포함하고, 주로 이 방법을 애용한 것이 악수였던 것으로 보인다.

2년 전에는 제연설비가 총체적으로 부실하다는 논란이 확산되어 국회에서 ‘제연설비 성능개선을 위한 토론회’가

열린 바 있고, 그 해 국정감사에서 무용지물이며 오히려 피난에 위험을 초래할 수 있다고 지적받은 바 있다. 그러나 그 악수에 대한 공식적인 인정이 어려워 방치되고 있는 상태이다.

즉, 그동안 지금의 화재안전기준에서 지엽적인 잘못된 부분을 지적·개정하여 왔으나, 근본 문제인 부속실단독제연의 불합리성을 지적하는 것은 피하고 있다는 것이다. 그것은 마땅한 대안을 제시할 수 없었기 때문일지도 모른다.

저자는 과감하게 이 부속실단독제연의 문제점을 지적하고, 나아가 상당한 위험성을 안고 있다는 점을 강조하면서, 이제는 부속실단독제연을 벗어나 그 대안으로 뒤에 기술하는 바와 같은 새로운 계단실제연방법을 도입할 것을 제안한다.

2. 현재의 부속실제연의 문제점

2.1 굴뚝효과로 인한 과압 우려

현재의 NFSC 501A에는 계단실에서 발생하는 굴뚝효과를 반영하여야하는 규정이 없고, 건설현장의 설계시공에도 반영된 적이 없어 부속실단독제연 방법이 주로 채택되어 왔다.

그래서 부속실단독제연을 설치한 고층건축물의 특별피난계단 제연설비에 대해서 살펴본다.

고층건축물에서 계단실은 시기가 겨울철이거나 화재 시의 화재 열연기가 침투한다면 정상굴뚝효과가 발생하여, 고층부에서는 과압이 발생하여 부속실출입문 및 거실출입문의 개방을 어렵게 할 수 있다.

이때 부속실에 대한 급기가압을 하게 되면 계단실 기압에 크게 영향을 미치게 된다.

일례를 들어 설명해본다. 계단실 높이 120 m (40층)인 건축물에서 외기 0 °C ($T_0 = 273$ K), 내기 20 °C ($T_s = 293$ K)인 경우에 대해 살펴보면, 제연을 하지 않을 때의 굴뚝효과는 중성면의 위치를 중앙이라고 보아 최고층 및 최하층은 중성면에서 수직거리 $h = 60$ m로 형성되는 내외차압(ΔP_{SO})은

$$\begin{aligned}\text{최고층: } \Delta P_{SO} &= 3,460 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right) h \\ &= 3,460 \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{293} \right) \times 60 = 52 \text{ Pa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{최하층: } \Delta P_{SO} &= 3,460 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right) h \\ &= 3,460 \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{293} \right) \times (-60) = -52 \text{ Pa}\end{aligned}$$

즉, 최고층은 외부보다 52 Pa이 높고, 최하층은 52 Pa이 낮다.

그런데 제연설비가 가동되어 부속실을 50 Pa로 급기 가압한다면, 계단실 1층 위치의 기압이 50 Pa로 상승할 것이고, 하층에서 고층으로 올라갈수록 1층으로부터의 수직거리(h)와 온도차에 비례하여 커져 최고층에 형성되는 압력

은 아래와 같이 154 Pa이라는 압력이 형성되게 될 것이다.

$$\begin{aligned}\Delta P_{SO} &= 50 + 3,460 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right) h \\ &= 50 + 3,460 \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{293} \right) \times 120 = 154 \text{ Pa}\end{aligned}$$

이 차압은 부속실에서 계단실로 열리는 계단실출입문(Figure 1의 7)에 작용하여 150 N 내외의 개방력을 필요하게 하고, 부속실에 50 Pa의 기압이 있으면 50 N 정도의 개방력을 감소시키지만, 이 출입문에 있는 자동폐쇄장치가 37 N 정도의 힘을 추가시켜, 결국 137 N 정도의 출입문개방력이 필요한 것이 된다.

그리고 이 계단실 기압은 문틈 등을 통하여 부속실기압에 영향을 미쳐, 과압배출장치가 없다면(현재 대부분이 없음) 계단실과 같은 154 Pa 수준이 될 것이며, 거실에서 부속실로 피난하는 출입문(Figure 1의 8)에는 부설된 도어클로저의 닫히는 힘이 가산되어 170 N이 넘는 개방력이 필요하게 될 것이다.

위 개방력들은 NFSC 501A가 규정하는 힘 110 N을 크게 초과하는 것이며 내·외부 기온차가 사례의 20 °C보다 더 클 수 있어, 이때는 200 N을 넘는 출입문 개방력이 소요될 것이다.

이러한 현상들이 정상굴뚝효과가 있는 계단실에 제연설비를 가동하면 고층부에서 발생되어, 오히려 피난을 방해하는 결과를 초래할 수 있는 것이다.

2.2 계단실 외부출입문개방 시 일어날 위험

제연설비가 작동되는 동안 거주자나 소방대에 의해 계단실과 옥외 간에 있는 출입문, 즉 피난층출입문이나 옥상

Figure 1. Structure of smoke control system.

출입문이 개방될 수밖에 없는데, NFSC 501A에 이것을 고려하라는 규정이 없고, 건설현장에서도 반영되지 않고 있는 상태이다.

그리하여 이를 반영하지 않은 소방대상물에서는 아래와 같은 위험이 초래될 수 있다.

2.2.1 굴뚝효과가 없는 때

계단실에 있는 피난층출입문 또는 옥상출입문이 개방될 때에는 부속실 누설공기에 의해 형성된 계단실 기압이 외부로 방출되어 대기압 수준으로 떨어질 것이다.

이때에는 부속실 피난인원이 출입한 후 출입문이 자동으로 닫히지 않는 현상이 일어난다. 이는 NFSC 501A 제25조가 규정하는 “제연 중에 계단실로 향하는 출입문이 열렸을 때 자동으로 닫혀야 한다.”는 규정을 어기는 것이 된다. 그 이유는 부속실 기압에 의해 출입문을 개방하는 힘이 자동폐쇄장치에 의해 닫히는 힘보다 크기 때문이다. 계단실 옥외출입문이 닫혀 밀폐상태일 때는 부속실의 누설공기에 의해 상당한 계단실기압을 형성할 수 있어서 잘 닫히지만, 옥외와 면하는 피난층출입문과 옥상층출입문 중 어느 하나만 개방되면 계단실기압이 0 Pa 수준으로 강하되어 닫히지 않는 현상이 발생되는 것이다.

이러한 사실은 대부분의 소방기술자들은 알고 있는데, 준공성능시험(TAB)을 그 건물에 사람출입이 없는 때에 실시하여 성능시험기준에 합격시키고 있다.

이는 화재안전기준을 위반하지 않았고, 준공처리가 시급하고, 그리고 지금까지 관례화되어 있었기 때문인 것이다. 그러나 가장 확실한 이유는 마땅한 대안이 없었기 때문일 것이다.

이런 계단출입문 안 닫힘 현상이 발생하게 되면, 그곳이 화재층이라면 부속실 기압을 유지하기가 어려워 화재실 연기가 계단실로 유출될 수도 있으며, 그곳이 화재층이 아니라면 열린 출입문으로 많은 급기가 유입되어 실제로 불이 난 화재층의 제연용 급기를 부족하게 만들 것이다.

2.2.2 정상굴뚝효과가 발생하고 있는 때

전기 2.1절에서 계단실 높이 120 m (40층)인 건축물에서 외기 0 °C, 계단실 20 °C인 경우에, 제연설비가 가동되어 부속실을 50 Pa로 급기 가압하면, 계단실 1층이 50 Pa이 되고, 최고층은 154 Pa이 순간적으로 형성되게 될 것이라고 하였다.

이렇게 40층이 154 Pa인 상태일 때 옥상으로 나가는 옥상출입문이 개방된다고 가정해본다. 이때에는 계단실에 별도 급기가 없고 각 부속실에서 누설되는 풍량 뿐이므로 40층은 거의 대기압 상태, 즉 중성면이 되어 1층은 -100 Pa 수준의 음압이 형성될 것이다.

이 음압이 저층 부속실출입문에 작용하게 되는데 저층 거실에 화재가 있다고 가정해보면 그곳의 거주자는 계단실로 피난할 것이고, 당황한 거주자는 등 뒤의 출입문을 닫지

못하고(열연기가 달려 나온다면 닫을 수가 없을지도 모른다) 다시 옥외로 탈출할 것이다.

그 거실출입문 및 부속실출입문은 심한 계단실의 음압으로 자동으로 닫히지 못할 것이고 부속실 급기는 모두 거실의 화염에 동반되어 계단실로 빨려 나올 수밖에 없을 것이다.

더운 연기가 유입된 계단실은 더욱 온도가 올라가서 빠른 상승기류가 형성될 것이고, 굴뚝효과는 더욱 강해지면서 계단실은 독가스 지옥으로 변할 것이다.

계단실에 피난 중인 사람이 있었다고 가정하면 끔찍한 일이 일어날 수밖에 없다.

2.3 실제적인 사례

위에 제기한 부속실단독제연만을 적용하는 특별피난계단제연에 대해 실제적인 사례를 연구 보고한 사례는 앞에 언급한 짧은 역사 때문인지 찾기 어렵다. 그러나 인터넷에서 ‘제연설비의 문제점’이라고 검색하면 수많은 문제제기 기사를 볼 수 있는데 “화재사망자 70~80%가 질식사”라는 2014년 MBC뉴스 기사가 눈에 확 들어오는데, 연기확산의 주원인은 계단실을 통한 연기확산이 큰 부분일 것으로 보인다. 그리고 제연설비 덕에 피해를 줄였다는 기사나 논문은 본적이 없으며 그 대책은 눈에 띄는 것이 없는 갑론을박 수준에 머물고 있다. 참고로 2018년 소방청 국정감사 중의 이진복 국회의원의 제연설비가 무용지물임을 질책하는 YouTube 영상을 References 2로 제시한다⁽²⁾.

3. 새로운 계단실제연방법1

3.1 정상굴뚝효과 경감

특별피난계단제연은 부속실단독제연으로는 앞에서 설명한 바와 같은 심각한 문제점이 있으므로 계단실 굴뚝효과를 경감할 수 있는 계단실제연 또는 계단실·부속실 동시제연을 실시하여야 할 것이다.

여기서 굴뚝효과를 경감시키는 논리에 대해 살펴보면, 계단실 내부 공기가 저층부에서 고층부로 흐르게 하여 그 때 발생하는 압력손실이 굴뚝효과에 의해 발생하는 압력상승을 상쇄하게 한다는 것이다.

이 논리에 의거 계단실급기가압제연설비를 정상굴뚝효과가 발생되면 계단실 하층부에 외부의 공기가 공급되게 하여 고층부로 흐르게 하고, 고층부에서 그 공기를 외부로 버린다는 것이 저자가 제안하는 새로운 제연방법의 첫째 요지이다.

3.2 굴뚝효과경감 계단실 급배기설비의 구성

계단실급기가압제연설비 및 배기설비의 구성을 Figure 1에 의해 설명한다.

고층건축물(1)은 전 층에 거실(2)과 부속실(3)이 있고, 계단실(4)은 전 층에 걸쳐 하나의 수직샤프트로 구성되어 화

재가 발생하여 제연설비가 가동되면 창문 등 모든 개구부는 자동으로 폐쇄된다. 계단실(4)의 최고층부와 최하층부에 일정한 기압에서 여단하여 고압의 실내공기를 배출하는 전자식 또는 기계식 플랩댐퍼(6, 6')를 둔다.

그리고 계단실(4)에 대해 신선한 외부공기를 급기장치인 송풍기(5), 수직풍도(16), 적절한 간격으로 설치된 자동차압 급기댐퍼들을 통해 계단실로 공급한다. Figure 1에는 여러 개의 자동차압급기댐퍼들을 3개의 군(群: 무리)으로 묶어 저층부자동차압급기댐퍼군(17)과 중층부자동차압급기댐퍼군(18)과 고층부자동차압급기댐퍼군(19)으로 표시하였다.

3.3 계단실 급배기설비의 작동

상기 플랩댐퍼(6, 6')와 급기장치(5, 16, 17, 18, 19)의 작동을 설명한다.

정상굴뚝효과(Normal stack effect)가 있는 계단실(4)에는, 중심부에 형성되는 중성면(Neutral Plane)과의 수직거리에 비례하여 아래로는 음(-)압이 발생하고 위로는 양(+)압이 발생한다.

계단실(4)의 최고층부에서는 일정한 기압에서 여단하는 전자식 또는 기계식 플랩댐퍼(6)에 의해 고압 공기를 외부로 배출되게 하고, 동시에 외부의 신선한 공기를 송풍기(5)로 수직풍도(16)에 공급하면 가장 낮은 기압형성부에 있는 저층부자동차압급기댐퍼군(17)이 크게 개방되어 급기의 대부분이 저층부에서 일어나게 되고, 그 급기는 계단실 내부를 통하여 고층부까지 흐르게 되어 굴뚝효과는 즉시 경감되게 된다.

시간이 경과하면서 저온 외기의 유입으로 계단실기온이 하강하여 굴뚝효과가 줄어들어 플랩댐퍼(6)의 공기배출량과 하층부자동차압급기댐퍼군(17)의 급기량은 줄어들고, 중층부자동차압급기댐퍼군(18)과 고층부자동차압급기댐퍼군(19)의 급기량은, 낮아지는 주변 기압에 상응하여 늘어나게 될 것이다.

다음 여름철 계단실과 같이 역굴뚝효과가 발생할 때는 저층부의 플랩댐퍼(6')와 자동차압급기댐퍼들(17, 18, 19)의 정상굴뚝효과 발생 시와 같은 원리의 작동으로 역굴뚝효과(Reverse stack effect)를 경감시킬 것이다.

4. 새로운 계단실제연방법2

4.1 외부출입문개방 시 내부공기 유출 억제

계단실(4)에서의 외부출입문인 피난층출입문(13)과 옥상층출입문(14)의 어느 하나 또는 모두가 열릴 때는, 유지하고 있던 계단실기압에 의해 외부로 유출되는 풍량이 아주 클 것이다.

현재 30층 건축물의 계단실에 대한 부속실단독제연 설계 예를 보면 송풍기 정격용량이 10 m³/s 정도인데 계단실의 외부출입문 하나가 열릴 때 유출되는 풍량이 이 크기에 가깝다. 일례를 들어 2 m² 개구부가 전면 개방되고 30 Pa

Figure 2. Air curtain effect.

차압에서 유출되는 누출유량은 아래와 같이 9 m³/s로 계산된다. 여기서, Q : 체적유량, A : 개구부면적, P : 차압.

$$Q = CA\sqrt{\frac{2P}{\rho}} = 0.64 \times 2\sqrt{\frac{2 \times 30}{1.2}} = 9 \text{ m}^3/\text{s} \quad (1)$$

이 유량은 전체적인 누설·방연용량에 가까운 큰 유량으로 하나의 옥외출입문개방에서 이 유량이 유출된다는 것을 고려하는 설계는 송풍기 등의 급기설비가 너무 커지는 큰 부담을 안는다. 저자는 이를 억제하는 방법으로 특수에어 커튼을 몇 개의 외부출입문에 별도로 구비하자는 것으로서, 제안하는 새로운 제연방법의 둘째 요지이다.

4.2 외부출입문개방 시 공기유출의 억제방법

계단실 급기가압제연을 실시하는 중에 외부출입문이 개방될 때 유출되는 유량을 대폭 억제하는 방법을 아래와 같이 구상하였다.

4.1절의 계산식(1)에 보인 것을 보면 유출유량은 유량계수(C)에 비례한다. 즉, 유량계수를 줄이는 방법을 강구하면 될 것이다.

다음 Figure 2에 보인 바와 같이 일반 개구부에서는 공기의 경우 유출기류의 단면적이 개구부면적의 64% 수준이 된다고 하여 이를 유량계수 $C = 0.64$ 라고 부르는데, Figure 3에 보인 바와 같이 개구부의 양옆과 상부에서 폭 6 mm 정도의 slit노즐로 30 m/s 수준의 강한 바람을 분사한다면 30 Pa의 계단실기압을 유지할 수 있을 것으로 추산한다. 이때 계단실 내부공기가 아닌 외부의 공기를 사용한다면 더 좋은 효과를 기대할 수 있다.

이때의 필요한 송풍량(Q)은 노즐단면적(A)와 분사속도(V)의 곱으로,

$$Q = AV = \left(\frac{6 \text{ mm}}{1000 \text{ mm/m}} \times 5 \text{ m}\right) \times 30 \text{ m/s} = 0.9 \text{ m}^3/\text{s}$$

인데 실험을 병행하는 풍량의 증감과 노즐의 변화를 통하여 적정 사양을 찾아야 할 것이다. 지금 가정한 속도(V)에 의한 필요이론정압(P)은,

Figure 3. Structure of air curtain on door.

Figure 4. Structure of spacial air curtain.

$$P = \frac{\rho V^2}{2} = \frac{1.2 \times 30^2}{2} = 540 \text{ Pa이다. } (\rho: \text{공기밀도})$$

송풍손실을 감안하여 송풍기의 실제 설계정압은 1,000 Pa의 수준으로 하여야 할 것이다.

Figure 4는 에어커튼을 방화문을 위에 설치하는 형상이지만, 이와 달리 방화문틀을 크게 하여 분사노즐을 내장하는 Air Chamber로 제작하고 외부에 둔 송풍기로부터 급기하는 방법이 더 효과적일 수 있다.

에어커튼의 에어차단효과를 유체역학적으로 설명한다면 계단실 30 Pa의 기압(P)이 낼 수 있는 유속(V)은

$$V = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \times 30}{1.2}} = 7.1 \text{ m/s인데,}$$

에어커튼의 바람풍속이 이 7.1 m/s가 될 때까지는 에어커튼기류의 동압(動壓)이 30 Pa을 초과하여 유출기류를 저지할 수 있는 것이다. 고속으로 노즐 에어방사속도가 멀리 갈 수 있도록 하는 노즐의 적용도 필요할 것이며, 나아가 속도가 7.1 m/s 이하로 떨어질 때에도 계단실기류의 외부유출을 방해하는 작용은 계속할 것이다.

Figure 3은 옥외출입문 주변에 에어커튼을 좌우(20)와 상부(21)에 설치한 그림이다.

나아가 상기 측부에어커튼(20)과 상부에어커튼(21)을 Figure 4에 보인 바와 같이 에어커튼기류(22)를 실내방향으로 출입문틀과 적절한 경사각(예: 5°~50°)으로 분사하는 구조를 가지도록 한다면 더 큰 유출기류억제효과를 달성할 수 있을 것이다. 즉, 에어커튼의 기류의 동압에 의한 힘과

유출하려는 실내기류의 동압에 의한 힘이 만나 결합한 압력은 벡터 합의 방향으로 포물선을 그리게 하여 유출저지 시간을 늘리는 효과를 얻는다는 것이다.

이상의 논리에 따른 에어커튼을 개발하여야 할 과제가 남아 있다.

5. 본 제안을 적용한 경우의 제연용량

본 제안의 이해를 돕기 위하여 앞의 내용을 적용한 하나의 현장을 가정하여 필요한 제연용량, 즉 송풍기용량을 추산해본다.

가정 현장은 40층 아파트건축물로서 계단실을 30 Pa로 급기가압 한다.

5.1 누설량

층당 누설량을 방화문 3개의 허용누설량으로 가정하면,

$$\begin{aligned} \text{층당 누설량은 } 3\text{개} \times 1.8 \text{ m}^3/60\text{개} &= 0.09 \approx 0.1 \text{ m}^3/\text{s} \\ \rightarrow \text{전층 } 0.1 \times 40 &= 4 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned} \quad (2)$$

5.2 굴뚝효과상쇄유량

내외 기온차이 20 °C일 때의 굴뚝효과 상쇄용 기류유량을 추산해 본다.

5.2.1 Tamura & Shaw식

$\Delta P_f = f \frac{h}{D_h} \frac{\rho v^2}{2} [Pa]$ 은 마찰계수(f)나수력반경(D_h) 등이 계단실의 구조복잡성으로 적용하기가 어려워 사용하기를 포기한다.

위 Tamura & Shaw식은 강경원소방학원에서 공개한 소방기술사 제102회 기출문제풀이에서 인용한 것임을 밝혀 둔다.

5.2.2 연속되는 직렬개구부로 본 해석

저자는 하나의 계단실 구조를 관찰한 결과 Figure 5에 보인 바와 같이 한개 층에 계단부분(A) 직상에 있는 $1.35 \times 2.3 = 3.1 \text{ m}^2$ 의 개구부(A')가 2개씩 있는 것을 발견하였다.

1층에서 40층까지에는 개구부 수가 80개가 직렬구조로 있어 유효유동면적(A_e)은

$$A_e = \frac{1}{\left(\frac{1}{3.1^2} \times 80\right)^{0.5}} = 0.347 \text{ m}^2,$$

20 °C 공기라고 보면 $\rho = 353/293 = 1.2 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, 상쇄해야 할 기압(굴뚝효과에 의한 상승기압):

$$\Delta P = 3,460 \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{293} \right) \times 120 = 104 \text{ Pa}$$

차압 104 Pa이 발생할 수 있는 유량은

$$q = C A_e \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} = 0.64 \times 0.347 \sqrt{\frac{2 \times 104}{1.2}} = 2.92 \text{ m}^3/\text{s} \text{이나 이}$$

Figure 5. Structure of stair-case.

유량을 배출하면 즉시 굴뚝효과가 모두 상쇄되어 40층은 30 Pa로 될 것이다.

그러나 이 풍량은 너무 커서 플랩댐퍼 시공에 부담이 된다.

그래서 뒤 6.6절에서 설명하는 정상시의 굴뚝효과 관리를 최고층 30 Pa로 계획한다고 전제해서 계산해본다. 즉, 최고층에 $\Delta P = 30$ Pa에서 작동하는 플랩댐퍼를 설치하고, 중성면이 맨 가운데라고 볼 때 1층은 -30 Pa로 볼 수 있으며, 외기온도 0°C ($T_o = 273$ K)라면 내기온도(T_s)는

$$\begin{aligned}\Delta P &= 3,460 \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) \times h \\ &= 3,460 \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{T_s} \right) \times 60 = 30 \text{ Pa}\end{aligned}$$

이를 풀면,

$$T_s = 284 \text{ K} (11^\circ\text{C}) \text{로 계산된다.}$$

이때 제연설비가 가동되어 1층이 30 Pa로 가압되면 최고층(40층)은 90 Pa이 된다. 이때 30 Pa에 설정된 플랩댐퍼는 즉시 60 Pa의 굴뚝효과를 상쇄시켜 30 Pa의 기압으로 낮추는 배출작동을 하도록 설계할 수도 있으나 그때의 풍량은 너무 커서 설계에 부담이 된다.

그래서 초기에는 30 Pa의 굴뚝효과를 즉시 상쇄하는 배출작동을 한다고 생각해본다. 40층은 즉시 60 Pa로 될 것이다.

이는 과압이 아닌 압력이며 시간이 지나면서 외기유입에 의한 굴뚝효과 약화로 서서히 30 Pa로 강하될 것이다. 즉, 플랩댐퍼는 30 Pa에서 여닫히되 60 Pa에서 30 Pa의 굴뚝효과를 저감하는 풍량을 배출하면 된다.

이를 식으로 세워 풀면,

$$\begin{aligned}Q &= CA_v = CA_e \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \\ &= 0.64 \times 0.347 \sqrt{\frac{2 \times 30}{1.2}} = 1.57 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned} \quad (3)$$

참고로, Figure 5의 개구부 A'에서 유속을 계산해보면 아래 계산과 같다. 여기서 V: 속도, Q: 체적유량, A': 개구부의 단면적.

$$V = Q/A' = 1.57/3.1 = 0.51 \text{ m/s}$$

Figure 6. Mechanical flap damper.

그리고, 여기에 적용할 플랩댐퍼의 제작 및 시공성에 대해 설명한다면, 30 Pa에서 개방을 시작하나 압력(P) 60 Pa에서 유량(Q) 1.57 m³/s를 배출하는 플랩댐퍼가 필요로 하는 유효개구면적(A)는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$Q = CA_v = 0.64A \sqrt{\frac{2P}{\rho}} = 0.64A \sqrt{\frac{2 \times 60}{1.2}} = 6.4A = 1.57$$

$$\text{위 식에서 } A = 1.57/6.4 = 0.245 \text{ m}^2$$

이 플랩댐퍼는 전자식 또는 기계식으로 내부기압이 외부보다 30 Pa 높을 때 열리고 낮을 때 닫히게 제작할 수 있다.

전자식 플랩댐퍼는 자동차압급기댐퍼와 유사하여 내외차압 감지에 의해 모터로 플랩을 여닫는 것으로 주문제작·시공에 비용측면에서 다소 불리하지만 기술상의 문제는 없을 것이다.

시공 및 유지관리 측면에서 유리한 기계식은 Reference 3의 특허를 응용하여 저자가 기초설계 한 유효개구면적 0.25 m²의 도면을 보면 Figure 6과 같으며 샘플제작 단계에 와 있다⁽³⁾. 참고로 본 플랩댐퍼를 시험 제작 시연한 유튜브 영상을 Reference 4에 보인다⁽⁴⁾.

5.2.3 보충량

2개 층 부속실에 대한 방연풍량

$$0.7 \text{ m/s} \times 2 \text{ m}^2 \times 2\text{개} = 2.8 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

5.2.4 옥외출입문 유출량

계단실 옥외로 직통하는 개구면적 2 m²인 피난층출입문 (13) 한 개가 있다고 가정하여,

(1) 에어커튼이 없을 때의 유출량(Q_1)은 아래와 같이 9 m³/s로 계산된다.

$$\begin{aligned}Q_1 &= CA_v = CA \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \\ &= 0.64 \times 2 \sqrt{\frac{2 \times 30}{1.2}} = 9 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

(2) 그런데 앞 4.2절에서 설명한 구조의 특수에어커튼을

설치한다면 개방출입문의 외부유출을 에어커튼이 없을 때에 비해 1/5정도로 감소하게 할 수 있다고 보아, 그때의 외부유출량(Q_2)은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$Q_2 = Q_1/5 = 9/5 = 1.8 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5)$$

옥상으로 피난하는 옥상층 출입문의 개방도 고려하여야 하는데 그때에는 상기 5.2절 (3)식에서 보인 굴뚝효과상쇄를 위한 플랩댐퍼의 배출이 중단되고 옥상출입문 개방 시의 $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 대부분으로 사용될 것이다.

앞 5.2.4의 (2)에서 외부유출량(Q_2)가 특수에어커튼에 의해 어떻게 가능할까를 보충 설명한다면, 일반적으로 개구부의 공기 유출 유량계수를 $C = 0.64$ 로 보는데, 개구부의 테두리 부근의 외부에서 강풍으로 역풍을 보낸다면, 이때의 유량계수는 분명히 줄어든 것인 바, 그 바람의 세기와 양을 조절하여 1/5인 $C = 0.12$ 정도로 줄어든게 할 수 있음은 자명하다고 할 것이다. 이를 보다 쉽게 설명해보자면 이 특수에어커튼은 태풍에 가까운 역풍을 일으키는 송풍장치라고 생각하거나, 출입문 밖에 직경 1 m의 선풍기 2대를 아래위로 두고 고속으로 돌린다고 상상하면 계단실의 기류 유출은 대부분 막히겠구나하는 확신이 들 것이다.

5.2.5 송풍기 용량

본 제안을 적용한 일례의 제연용량, 즉 송풍기 용량(Q_T)은 상기 (2)식, (3)식, (4)식, (5)식의 합에 여유(15%)를 가산하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$Q_T = (4 + 1.57 + 2.92 + 1.8) \times 1.15 = 11.7 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.2.6 평가

본 제안을 적용하는 현장이 부속실단독제연으로 적용하는 현장에 비해 송풍기 용량이 크게 늘어나지 않는다. 즉, 20% 수준의 증가로 계단실의 굴뚝효과와 외부출입문개방을 고려하는 새로운 제연방법이 가능할 것이다.

6. 본 제안 적용에 추가될 수 있는 기술

6.1 엘리베이터샤프트의 굴뚝효과를 경감

본 제안의 계단실 굴뚝효과경감 수단을 가까이에 있는 엘리베이터샤프트에 대해 적용할 수 있다. 즉, Figure 1에 의하여 설명하면 엘리베이터샤프트(9)에 대하여 최상부에 일정기압에서 내부공기를 배출하는 플랩댐퍼(6'')를 설치하고 최하층부에는 송풍기(5', 5를 겸용 가능함)와 자동차압급기댐퍼(10)에 의해 일정기압 이하가 되면 급기할 수 있게 하여 엘리베이터샤프트의 굴뚝효과를 경감시킬 수 있을 것이다.

6.2 기존의 부속실단독제연 현장의 문제점 해결

이미 준공된 소방대상물에서 대부분이 부속실단독제연 방식으로 제연설비를 갖추고 있는데, 여기서는 계단실의 굴뚝효과발생과 피난층이나 옥상 외부출입문 개방 시에 대한 대응 기능이 없다.

본 제안을 적용하면 이러한 현장에 정상굴뚝효과와 외부출입문 개방을 고려하는 개선이 비교적 용이하다. 즉, 부속실제연이 이미 시공되어 있으므로 본 제안의 계단실 급기는 하층부에만 실시하여 고층부에서 플랩댐퍼에 의해 배출되게 하고, 외부출입문에 기류유출을 억제하는 특수에어커튼을 추가 설치하면, 정상굴뚝효과를 경감시키면서 계단실 기압을 적절하게 유지할 수 있는 제연설비로 개선될 수 있을 것이다.

6.3 계단실·부속실 동시제연의 효과 기능화

계단실만 단독으로 제연하는 것으로 본 제안을 적용하면서, 부속실(3)의 원활한 압력형성을 위해 계단실(4)과 부속실(3) 사이에 있는 벽체 또는 부속실출입문(7)에 부속실을 향해 개방되는 미압플랩댐퍼(Figure 1의 11)를 설치하여 계단실 기압으로 부속실 기압을 비교적 쉽게 형성하게 하여 ‘계단실과 부속실을 동시제연’과 유사한 제연효과를 도모할 수 있을 것이다.

6.4 엘리베이터샤프트를 수직풍도로 활용

엘리베이터샤프트가 계단실(4)에 인접한 구조라면 이를 수직풍도(16)로 활용하여 투자비를 절감할 수 있다. 즉, 엘리베이터샤프트(9) 하층부에 송풍기에서 직접 기류를 유입시키고 하층부·중층부·상층부에 자동차압급기댐퍼군(17, 18, 19)의 일부 또는 전부를 설치하는 수직풍도(16)의 역할을 하도록 활용할 수 있다. 이 엘리베이터샤프트를 급기압풍도로 활용하는 것은 1,000 여건의 실적을 가진 10년 이상의 역사를 가진 G-ENP사의 기술을 활용한다는 생각에서 언급한 것임을 밝혀둔다.

6.5 투자비가 저렴하다

본 제안을 ‘계단실만 제연’하는 방법으로 신축건축물에 적용한다면, 종전의 ‘부속실단독제연’을 적용하는 경우에 비해 우수한 제연성능을 발휘하는데도 자동차압급기댐퍼의 수량이 감소하여 전체적으로 저렴한 투자비가 소요될 것이다.

6.6 평상시의 정상굴뚝효과용으로 활용

평상시에도 고층건축물에서는 겨울철 계단실 굴뚝효과로 에너지손실, 틈새소음, 출입문충격음 등 많은 트러블이 발생하고 있다. 본 제안에 의한 계단실제연설비를 설치하면 화재시가 아닌 평상시의 동절기 정상굴뚝효과 경감용으로도 활용할 수 있을 것이다. 즉, 동절기 추위가 심하지 않은 지역 또는 계단실이 영하의 온도로 강하되어도 괜찮은

경우에는, 본 제안 계단실제연설비를 송풍기는 정지된 상태에서 플랩댐퍼(6)과 수직풍도(16)의 하층부자동차압급기댐퍼군(17)의 일부(최하층 댐퍼 1~2개)를 작동상태(예: 30 Pa에서 여닫도록 설정)로 하면, 계단실 정상굴뚝효과가 발생할 때 고층부에서 플랩댐퍼(6)가 고압공기를 배출하게하고, 동시에 하층부자동차압급기댐퍼군(17) 중 일부는 개방되어, 발생한 음압에 의해 외기가 흡인되게 함으로써 계단실 기온이 강하되어 정상굴뚝효과가 악화되도록 활용할 수 있다.

만약 혹한인 지역으로 계단실이 영하의 온도로 강하되지 않도록 해야 하는 경우에는, 앞에 말한 플랩댐퍼(6)과 하층부자동차압급기댐퍼군(17)의 일부에 의해 계단실 기온을 적정수준(예: 5 °C)으로 하강된 시점에, 송풍기(12)의 가동에 의해 수직풍도(16)로 고층부 공기를 흡인하여 하층부 자동차압급기댐퍼군(17) 중 개방된 일부에서 방출되게 하여 그 공기가 계단실 상승기류가 되어 정상굴뚝효과를 추가 약화시키도록 할 수도 있을 것이다.

7. 결 론

고층건축물의 특별피난계단 및 부속실 제연설비의 신뢰

도는 바닥을 치고 있다. 아직도 이 기술은 짧은 역사를 가지고 있어 시행착오의 단계에 있다고 보아야 할 것 같다.

현재의 특별피난계단실제연은 굴뚝효과고려와 계단실에서 외부로 향하는 외부출입문의 개방을 고려하는 것이 누락된 것이라는 것을 인정하고 이를 보충하는 새로운 제연방법을 찾아야 한다.

많은 소방기술인들의 본 제안에 대한 긍정적인 접근을 통하여 새로운 특별피난계단제연이 탄생하고, 나아가 보다 안전한 고층건축물 특별피난계단이 실현될 수 있기를 기대한다.

References

1. NFSC 501A, "Fire Safety Standards for Ventilation Equipment in Stair Rooms and Auxiliary Rooms of Special Evacuation Stairs" (2013).
2. YouTube. <https://youtu.be/cSf-7jltOC4>
3. Y. K. Kim, "Mechanical Flap Damper", Korean Patent no. 10-0960810 (2010).
4. YouTube. <https://youtu.be/95utE5ESwAQ>