

연돌효과가 급기가압 제연시스템에 미치는 영향에 대한 현장실험

Field Experiment on Influence of Stack Effect to Pressure Differential System for Smoke Control

김 정 업

Jung-Yup Kim

한국건설기술연구원 화재및설비연구소
(2008. 6. 18. 접수/2008. 9. 11. 채택)

요 약

고층건물에서 급기가압 제연시스템과 같이 연기제어를 위해 제연구역에서의 압력차를 이용하는 제연시스템을 성공적으로 설계하고 운영하기 위해서는 건물내 압력형성에 영향을 미치는 건축적 요인들을 검토해야 하며 그중 큰 영향을 발휘하는 요인이 연돌효과이다. 본 연구에서는 고층건물의 피난환경과 제연시스템에 대해 연돌효과가 미치는 영향을 검토하기 위해서 여름과 겨울철에 각각 국내 고층건물을 대상으로 급기가압 제연시스템을 가동하면서 피난계단, 부속실 및 거실에서의 압력변화를 측정하고 분석하였다. 연돌효과의 영향이 커지는 겨울철의 경우 급기가압 제연시스템이 가동되면 부속실에서 계단쪽으로는 누기현상과 연돌효과가 합쳐지면서 고층부의 계단실내 압력이 크게 상승하여 재실자가 대피를 위해 피난문을 열고자 할 때 문제가 발생할 수 있다.

ABSTRACT

In order to design and operate successfully the pressure differential system for smoke control which uses difference of pressure between compartments of building, architectural factors affecting the pressure field of building should be examined and the stack effect is one of the important factors. The field experiments on pressure field in two buildings of 21 stories and 31 stories in summer and winter season with regard to on/off condition of the pressure differential system are carried out to evaluate the influence of stack effect to evacuation and smoke management of high-rise building. In winter season when the stack effect increases, as the pressure differential system starts to operate, the pressure in upper stair rises largely due to the combination effect of the air infiltration from lobby to stair and the stack effect.

Keywords : Pressure differential system, Smoke control, Stack effect, High-rise building

1. 서 론

도시가 고도화·집적화되면서 건설구조물의 대형화, 고층화 및 복합화가 급격히 진행됨에 따라 화재에 취약한 건설구조물이 증가되고 있어, 인명안전을 위한 효과적인 화재대책의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 특히 화재시 피난 및 소화활동에 큰 지장을 초래하고, 인명안전에 가장 큰 위협이 되고 있는 연기의 제어를 위한 제연시스템의 중요성이 강조되고 있다.

선진외국에서는 과거 대형화재사고인 MGM Grand

호텔, Roosevelt 호텔 및 Johnson City Retirement Center 화재에서와 같이 연기확산에 의한 질식사 인명사망의 주요원인이며, 이에 대처하기 위한 신뢰성 있는 제연시스템의 필요성을 오래전부터 인식하여, 연기생성·확산·제어분야의 이론적 기반 확립과 다양한 실규모 실험을 통하여 제연시스템 설계기술을 개발하여 왔으며,^{1,2)} 효율성과 적용성을 확보한 계기준정립에 지속적인 투자를 하고 있다. 특히 고층건물을 대상으로 실제적인 제연시스템의 설계인자 연구와 성능실험을 수행하여 왔다.^{3,4)}

국내에서는 고층건물의 피난안전확보를 위하여 화재안전기준 NFSC501A의 “특별피난계단의 계단실 및 부

† E-mail: jykim1@kict.re.kr

속설 제연설비의 화재안전기준”가 제시되고 있으며 제연구역의 기압을 화재가 발생한 거실보다 높게 유지시켜 제연구역내로 연기의 침투를 방지하도록 하고 있다.⁵⁾ 이러한 목적을 위해 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 방법이 제연용 송풍기와 풍도 및 급기댐퍼를 이용하여 거실과 계단실 사이의 부속실내 기압을 높여 주는 급기가압 제연시스템이다. 급기가압 제연시스템에서는 연기의 침투를 방지하면서 동시에 대피자가 출입문의 개방에 어려움이 없도록 하기 위해서 계단실-부속실 및 부속실-거실간 차압을 일정범위내로 유지해야 하며, 이를 위해 설비적인 측면에서 차압조절용 댐퍼나 플랩댐퍼를 채택하고 있다.

이와 같이 고층건물에서 제연구역에서의 압력차를 이용하는 제연시스템을 성공적으로 설계하고 운영하기 위해서는 건물내 압력형성에 영향을 미치는 건축적 요인들을 검토해야 하며 그중 큰 영향을 발휘하는 요인이 연돌효과이다. 연돌효과로 인한 이론적인 압력차는 다음의 식 (1)에 의해 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_{st} &= g\Delta\rho(N-h) \\ &= g\rho_o(\Delta T/T_i)(N-h) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, ΔP_{st} : 연돌효과로 인한 압력차(Pa)

g: 중력가속도(m/s^2)

h: 측정점 높이(m)

N: 층상대 높이(m)

T_i : 실내온도(K)

ρ_o : 실외공기밀도(kg/m^3)

연돌효과는 화재시 제연과 피난을 비롯해서 실내환경, 에너지손실 및 출입문·엘리베이터 오작동 등 고

층건물내 많은 현상에 영향을 미치는 것으로 판단되고 있으며, 국내외에서 지속적인 연구가 수행되고 있다. 현장실험을 통해 업무시설로 사용되고 있는 지상 39층의 건물을 대상으로 연돌효과에 의한 압력변화가 측정·분석되었으며 연돌효과로 인한 문제점 및 이의 보완조치가 검토되었고,⁶⁾ 고층건물에서의 연돌효과에 영향을 미치는 건축적 인자들이 선정되어 네트워크 모델의 시뮬레이션이 수행되고 인자들의 영향이 정량적으로 평가되었다.⁷⁾ 한편 주거용 고층건물이 증가하면서 주거형의 건축·설비적 특성을 가지는 국내 건물을 대상으로 연돌효과에 의한 영향이 실제 측정과 시뮬레이션을 통해 규명되었다.^{8,9)}

이러한 선행연구 내용과 더불어 고층건물에서의 피난과 제연에 대한 연돌효과의 영향을 실제적으로 분석하여 효과적인 연기안전방안에 반영하기 위해서는 피난계단에서 연돌효과에 의해 생성되는 압력장 및 급기가압 제연시스템 가동시의 연돌효과 영향에 대한 검토가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 피난계단에서의 압력형성과 급기가압 제연시스템에 대한 연돌효과의 영향을 분석하기 위해 연돌효과가 미미한 여름철과 연돌효과가 크게 발생하는 겨울철에 국내 고층건물을 대상으로 급기가압 제연시스템을 가동하면서 거실, 부속실 및 계단에서의 실내압력을 현장에서 측정하고 측정결과를 검토하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 Table 1과 같이 여름철과 겨울철에 실제 운영중인 21층과 31층의 고층 건축물을 대상으로 급기가압 제연시스템의 가동전과 가동후의 상태에서

Table 1. Conditions of experiment

CASE	CASE1	CASE2
Building	Building A	Building B
Total Stories	21 stories above ground, 3 stories below ground	31 stories above ground, 7 stories below ground
Pressurized space	Lobby only	Lobby only
Season	Summer	Winter
Temperature	Outside	29.0 °C
	Stair	27.4 °C (11th floor)
	Accommodation	26.5 °C (11th floor)
Location and Air Volume of Fan	Mechanical Room at 1st floor below ground and rooftop, 300 CMM/60 mmAq	Mechanical Room at 7th floor below ground and rooftop, 333 CMM/80 mmAq
Measuring Point	Simultaneous measurement of Pressure in Accommodation, Lobby and Stair at 2nd, 11th and 18th floors	Simultaneous measurement of Pressure in Accommodation, Lobby and Stair at 3rd, 15th and 30th floors

거실(Accommodation), 부속실(Lobby) 및 계단(Stair)에서의 실내압력을 측정하였다. 건축물의 높이에 따른 영향을 알아보기 위해서 저층, 중층 및 고층을 나타내는 3개의 층에서 압력을 측정하였다. 대상 건축물의 급기 가압 시스템은 2곳 모두 부속실만 급기가압하고 있으며, 여름철인 CASE 1의 경우 실험수행시 실외평균온도가 29°C가 되었으며 겨울철인 CASE 2의 경우는

7°C가 되었다. Figure 1과 Figure 2는 각각 CASE 1과 CASE 2에 대한 압력센서의 설치 개요도를 보여주고 있다. Figure 3은 각 건물에 설치된 급기가압용 송풍기를 보여주고 있고, Figure 4는 부속실내에 설치되어 부속실에 급기를 하고 차압을 일정수준으로 조절하는 기능을 담당하는 차압조절용 자동댐퍼의 모습을 보여주고 있다. 한편 Figure 5는 각 실내에 형성되는 압력을 측정하기 위한 압력계를 도시하고 있다. 본 연구에서 사용한 압력계는 대기압계로서 800-1100 hPa의 측정범위가 유효하다.

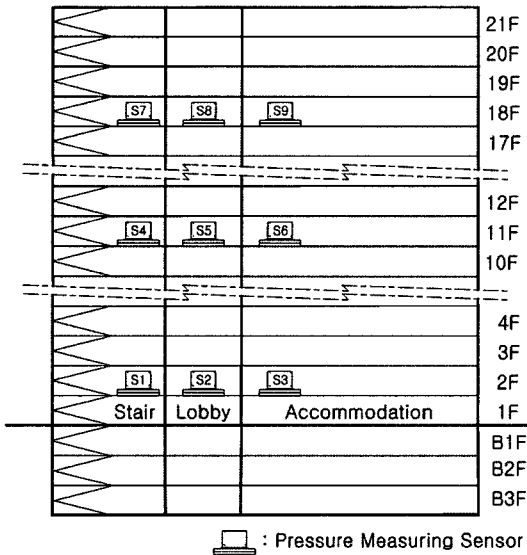


Figure 1. Schematic diagram of experiment layout for CASE1.

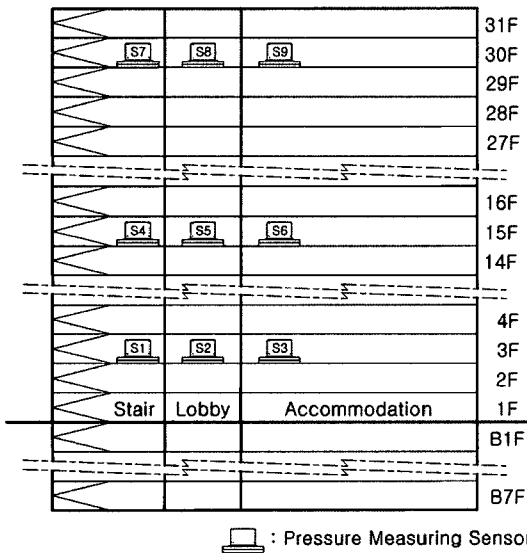


Figure 2. Schematic diagram of experiment layout for CASE2.



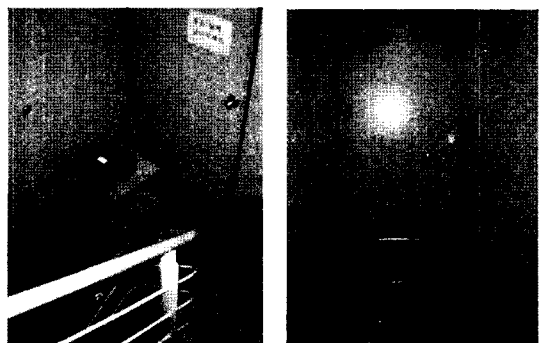
(a) Building A (b) Building B

Figure 3. Photographs of blower for smoke control system.



(a) Building A (b) Building B

Figure 4. Photographs of lobby and damper.



(a) Building A (b) Building B

Figure 5. Photographs of pressure measuring sensor.

3. 결과 및 검토

Figure 6과 Figure 7은 CASE 1의 실험결과를 보여주고 있다. Figure 6은 급기가압 제연시스템을 가동하기 전부터 가동한 후까지 각 측정지점에서의 압력변화를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 저층에서 고층으로 올라갈수록 대기압이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 제연시스템을 가동하기 전에는 동일한 층에서의 계단, 부속실 및 거실간 압력차가 거의 발생하지 않고 있으며, 이는 여름철에 측정이 수행된 CASE 1의 경우 평상시 계단에서 연돌효과의 영향이 크지 않기 때문이다. 급기가압 제연시스템을 가동하면 각 층의 부속실은 제연송풍기에 의해 외부공기가 급기되면서 압력이 상승한다. 한편 부속실과 함께 각 층의 계단에서도 압력이 상승하고 있음을 알 수 있는데, 이는 급기가압 제연시스템이 가동되면 가압된 부속실에서 계단으로 피난문의 틈새를 통한 공기의 누기가 발생하기 때문으로 판단된다.

Figure 7은 CASE 1에 대하여 각 층에서 “계단실 압력-부속실 압력”의 차압과 “부속실 압력-거실 압력”의 차압을 각각 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 급기가압 제연시스템을 가동하지 않을 경우 각 층에서 실간 압력차가 크게 발생하지 않고 있다. 한편 Figure 7(a)에서 제연시스템이 가동하지 않을 때 계단실의 압력이 부속실보다 약 5 Pa정도 약간 낮게 나타나고 있는데 이는 실내외 기온차가 약 2°C 정도이므로 역연돌효과가 크지 않고 또한 피난계단이 지하층으로 연결되어 있어 2층의 계단실내 공기가 지하층으로 이동하기 때문으로 사료된다.

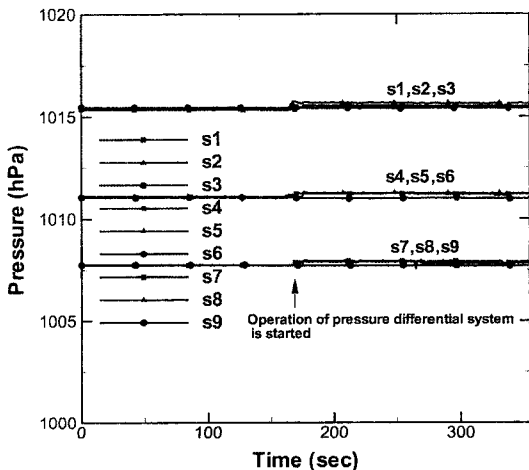
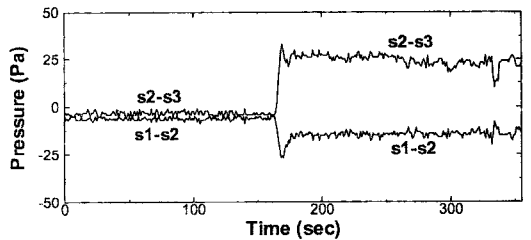
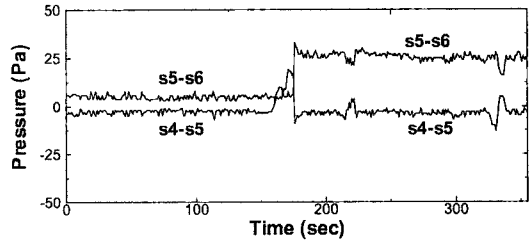


Figure 6. Pressure variations for CASE1.

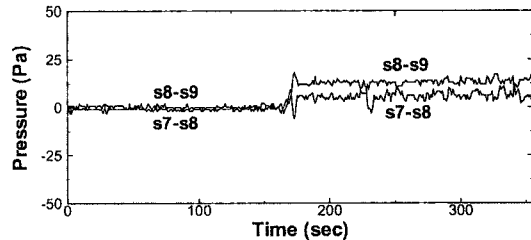
급기가압 제연시스템을 가동하면 2층에서는 거실에 비해 부속실 압력이 약 24 Pa정도 상승하며 11층에서는 약 25 Pa, 18층에서는 약 13 Pa의 부속실-거실간 차압이 발생한다. 한편 급기가압 제연시스템 가동시 “계단실 압력-부속실 압력”의 차압은 그림에서와 같이 2층에서는 약 -14 Pa, 11층에서 약 -3 Pa, 18층에서 약 6 Pa로 되고 있으며 이와 같이 계단실과 부속실의 압력차가 크지 않은 것은 공기누기에 의한 계단실내 압력상승이 주요원인이다. 한편 각 측정대상층에서의 차압이 일정하지 않은 것은 다음과 같은 측면 때문이다. 즉, 앞에서 언급한 바와 같이 부속실과 거실간 압력차는 연기침투와 출입문 개방의 곤란함을 동시에 방지하기 위하여 일정범위내로 유지하도록 설계되어 있으며 (NFSC501A의 기준 : “스프링클러 설치시 12.5 Pa 이상의 차압”과 “110 N 이하의 개방력”), 급기가압 제연시스템이 실제로 가동되면 각 층별로 제연용 송풍조건, 각 부속실의 자동دم퍼 운전조건 및 누기조건 등에 따



(a) 2nd floor



(b) 11th floor



(c) 18th floor

Figure 7. Variations of pressure difference between each compartment for CASE1.

라서 차압이 일정범위안에서 변동하면서 유지하게 되기 때문이다.

이상에서와 같이 여름철에는 계단과 같은 건물의 수직통로에서 연돌효과에 의한 영향이 크게 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.

Figure 8과 Figure 9는 CASE 2의 실험결과를 보여주고 있다. Figure 8은 급기가압 제연시스템을 가동하기 전부터 가동한 후까지 각 측정지점에서의 압력변화를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 제연시스템을 가동하기 전의 경우 저층인 3층에서는 “피난계단 압력 < 부속실 압력 < 거실 압력”의 순으로 압력이 형성되고, 고층인 30층에서는 “피난계단 압력 > 부속실 압력 > 거실 압력”의 크기로 실내압력이 형성되는 것을 알 수 있다. 이러한 압력장 형성결과는 여름철의 실험에서는 관찰할 수 없는 것으로서, 겨울철에는 피난계단내 연돌효과가 발생하여 저층에서는 거실로부터 피난계단으로 공기흐름이 형성되고 이러한 공기가 고층으로 상승하여 고층에서는 피난계단에서 부속실로 그리고 부속실에서 거실로 유동이 형성되는 것을 알 수 있다.

급기가압 제연시스템을 가동하면 각 층의 부속실은 송풍기에 의해 외부공기가 급기되면서 압력이 상승한다. 부속실과 함께 각 층의 계단에서도 압력이 상승하고 있음을 알 수 있고, 그 상승폭이 고층으로 올라갈수록 더 커지고 있다. 이와 같은 계단실의 압력상승은 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, 급기가압 제연시스템이 가동되면 가압된 부속실에서 계단으로 누기량이 증가하여 계단실에서의 압력상승이 발생하고 연돌효과가 합쳐지면서 고층으로 올라갈수록 압력상승폭이 커지는 것이다. 실험에서 고층인 30층의 경우 급기가압 제연

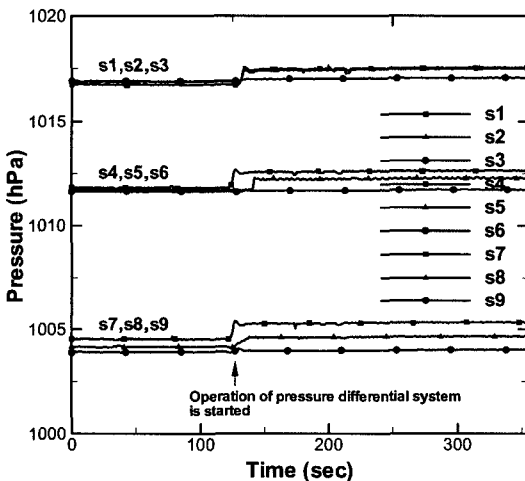


Figure 8. Pressure variations for CASE2.

시스템을 가동하면서 계단실의 압력이 약 75 Pa 정도 급격히 상승하며 그로인해 “계단실 압력-부속실 압력”의 차압이 시스템 가동전에 약 36 Pa에서 시스템 가동 후 약 67 Pa로 상승하게 된다.

이와 같이 급기가압 제연시스템이 가동되면 계단부에서는 연돌효과와 함께 부속실에서의 누기현상이 합쳐지면서 계단실과 부속실간 차압이 증가하여 화재발생시 피난을 하는 재실자가 피난문을 개방하는 데 문제가 발생할 수 있다. 따라서 화재발생시 연기로부터 안전한 피난환경을 제공하기 위해 설치하는 급기가압 제연시스템이 그 설치목적과 반대로 재실자의 피난에 문제를 발생시킬 소지가 있으므로 이를 방지하기 위해서는 급기가압 제연시스템의 가동과 동시에 계단부에서의 연돌효과를 감소시킬 수 있는 방안의 제시가 필요하다.

Figure 9는 CASE 2에 대하여 각 층에서 “계단실 압력-부속실 압력”의 차압과 “부속실 압력-거실 압력”의

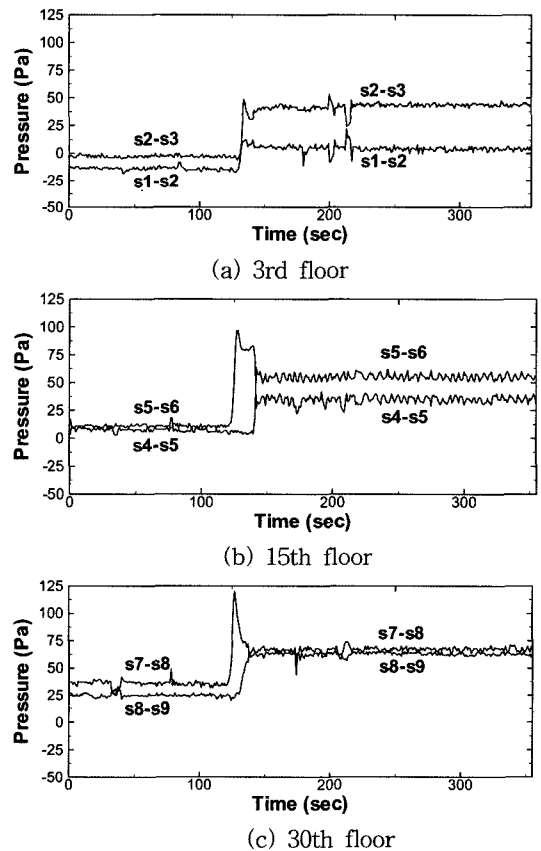


Figure 9. Variations of pressure difference between each compartment for CASE2.

차압을 각각 나타낸 것이다.

급기가압 제연시스템이 가동되지 않는 상태에서 순수한 연돌효과로 인해 30층에서는 피난계단에서 부속실 방향으로 약 36 Pa의 압력이 작용하고 있으며 3층에서는 반대로 부속실에서 피난계단 방향으로 약 14 Pa의 압력이 작용하고 있다.

한편 급기가압 제연시스템이 가동되면 고층인 30층의 경우 앞에서 언급한 바와같이 계단실의 압력상승폭이 급기가 되는 부속실의 압력상승폭보다 커지게 되고 그로 인해 계단실과 부속실간 압력차가 급기가압 제연시스템이 가동되기 전보다 더 증가하는 것이 명확히 나타나고 있다. 한편 30층에서의 부속실과 거실간 압력차를 보면

급기가압 제연시스템이 가동되기 전에는 연돌효과와의 영향으로 약 25 Pa 정도 부속실의 압력이 높으며, 급기가압 제연시스템을 가동하면 부속실이 가압되기 때문에 그 압력차가 약 63 Pa로 더 커진다.

저층인 3층에서는 급기가압 제연시스템이 가동되지 않은 상태에서 계단실의 압력이 부속실 압력보다 낮으나 급기가압 제연시스템이 가동되면 부속실에서 계단실로 공기가 누기되면서 전체적인 계단실의 압력이 상승하고 이로 인해 3층의 계단실의 압력이 급기가 되는 부속실의 압력보다 약 4 Pa 정도 더 높게 형성된다. 중간층인 15층에서도 유사한 경향이 발생하여 급기가압 제연시스템을 가동하면 계단실의 압력 상승폭이 가압되는 부속실의 압력 상승폭보다 더 커지며, 정량적으로 계단실의 압력이 부속실의 압력보다 약 35 Pa 정도 더 높게 형성된다. 이와같이 실험대상 건물에서 급기가압 제연시스템이 가동되면 차압측정 대상층인 3층, 15층 및 30층에서 모두 계단실의 압력이 부속실보다 높게 형성되는데, 실험대상 계단이 지하7층까지 연결되어 있고 3층의 차압이 약 4 Pa 정도이므로 지하층을 포함하는 3층미만 계단에서는 부속실에서 계단쪽으로 공기가 유입되는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고층건물의 피난환경과 제연시스템에 대해 연돌효과가 미치는 영향을 검토하기 위해서 여름과 겨울철에 각각 국내 고층건물을 대상으로 급기가압 제연시스템을 가동하면서 피난계단, 부속실 및 거실에서의 압력변화를 측정·분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 여름철에는 건물의 수직통로에서 연돌효과가 크게 발생하지 않기 때문에 급기가압 제연시스템을 가동

하지 않은 상태에서는 고층건물의 동일한 층에서의 계단, 부속실 및 거실간 압력차가 크게 발생하지 않고 있다.

2) 여름철에 급기가압 제연시스템을 가동하면 각 층의 부속실은 외부공기가 급기되면서 압력이 상승한다. 이때 각 층의 계단실의 압력도 부속실의 압력상승과 비슷한 정도로 상승하는데, 이는 가압된 부속실에서 계단으로 피난문의 틈새를 통한 공기의 누기가 발생하기 때문이다.

3) 겨울철에는 피난계단내 연돌효과가 발생하여 급기가압 제연시스템을 가동하지 않은 상태에서 저층에서는 “피난계단 압력 < 부속실 압력 < 거실 압력”의 순으로 압력이 형성되고, 고층에서는 “피난계단 압력 > 부속실 압력 > 거실 압력”의 크기로 실내압력이 형성된다. 압력차를 정량적으로 분석하면 30층에서는 피난계단에서 부속실 방향으로 약 36 Pa의 압력이 작용하고 3층에서는 반대로 부속실에서 피난계단 방향으로 약 14 Pa의 압력이 작용한다.

4) 겨울철에 급기가압 제연시스템이 가동되면 부속실에서 계단쪽에서의 누기현상과 연돌효과가 합쳐지면서 고층으로 올라갈수록 계단실에서의 압력상승폭이 증가한다. 정량적으로 30층의 계단실 압력은 급기가압 제연시스템이 가동되면 약 75 Pa 정도 급격히 상승하며 이로 인해 계단실 압력이 가압이 진행되는 부속실 압력에 비해 약 67 Pa 정도 높게 형성된다.

5) 상기항과 같은 차압의 증가로 인해 화재발생시 피난을 하는 재실자가 피난문을 개방하는 데 문제가 발생할 수 있다. 따라서 화재발생시 연기로부터 안전한 피난환경을 제공하기 위해 설치하는 급기가압 제연시스템이 그 설치목적과 반대로 재실자의 피난에 문제를 발생시킬 소지가 있으므로 이를 방지하기 위해서는 급기가압 제연시스템의 가동과 동시에 계단부에서의 연돌효과를 감소시킬 수 있는 방안의 제시가 필요하다.

참고문헌

1. BS EN12101-6, “Smoke and heat control systems - Part6 : Specification for pressure differential systems” (2005).
2. NFPA 92A, Standard for Smoke-Control Systems Utilizing Barriers and Pressure Differences(2006).
3. G.T. Tamura, “Fire Tower Tests of Stair Pressurization Systems with Overpressure Relief”, ASHRAE Trans. Vol.96(1990).
4. G.T. Tamura, “Assessment of Stair Pressurization System for Smoke Control”, ASHRAE Trans. Vol. 98(1992).

5. NFSC501A, 특별피난계단의 계단실 및 부속실 제연 설비의 화재안전기준(2007).
6. 조재훈, 양인호, 여명석, 김광우, “사례연구를 통한 고층건물에서의 연돌효과 실측 및 저감방안”, 대한건축학회논문집(계획계), 제18권 제7호, pp.169-176(2002).
7. 양인호, 여명석, 조재훈, 김광우, “고층건물에서의 연돌효과 시뮬레이션”, 설비공학논문집, 제14권 제6호, pp.456-467(2002).
8. 이광호, 김상인, 박용후, 문장수, 손장열, “초고층 주상복합아파트의 기밀 성능 및 연돌 효과 특성에 관한 연구”, 대한건축학회논문집(계획계), 제21권 제12호, pp.279-286(2005).
9. 조재훈, “고층 주거건물에서의 압력분포 시뮬레이션 및 압력차 문제 해결”, 대한건축학회논문집(계획계), 제21권 제11호, pp269-276(2005).