

연돌효과를 고려한 급기가압 제연시스템의 수치해석 연구

김정업

한국건설기술연구원 화재안전연구소

Numerical Analysis on Pressurization System of Smoke Control in Consideration of Stack Effect

Jung-Yup Kim

Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

(Received May 10, 2013; Revised August 9, 2013; Accepted August 9, 2013)

요 약

압력차를 이용해서 연기를 제어하는 급기가압 제연시스템의 경우에는 건축물 내의 압력 형성에 영향을 미치는 인자들을 설계에 반영해야 하며, 연돌효과가 중요한 인자 중 하나이다. 본 연구에서는 네트워크 모델 기반의 수치해석적 방법을 이용해서 20층 규모의 건축물 피난계단을 대상으로 연돌효과가 포함된 급기가압 제연시스템의 운전 특성을 분석하였다. 연돌효과만 작용하는 경우와 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우 및 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우의 3가지 조건에 대해서 해석을 수행하였다. 층별로 구획실의 압력과 공기 유량에 대한 상세한 해석결과를 제시하였으며, 연돌효과의 영향을 가시적으로 표현하였다. 한편 연돌효과와 급기가압 효과가 합해진 만큼 계단실의 압력이 상승하는 해석결과와 이에 따른 문제점을 제기하였다.

ABSTRACT

When the pressurization system that uses difference of pressure for smoke control is designed, the factors influencing on the pressure field in building should be applied to design process and the stack effect is one of the main factors. Numerical analysis based on network model in 20-story building is carried out to analyze the pressurization system of smoke control in consideration of stack effect. Calculations are conducted for three conditions, that is, stack effect only, pressurization only and stack effect plus pressurization. Results including the detailed pressure field and flow rate at each floor are represented and the stack effect are effectively visualized. Meanwhile, the pressure of stairwell is increased as much as the summation of the stack effect and pressurization, and the problem induced by rise of pressure is pointed out.

Keywords : Pressurization system, Smoke control, Stack effect, Numerical analysis, Network model

1. 서 론

산업이 발전하고 도시가 고도화 되면서 건축물의 고층화와 복합화 추세가 두드러지고 있다. 이러한 과정에서 건축물의 화재안전을 확보하기 위한 기술의 개발이 요구되고 있으며, 특히 화재시 인명손실의 가장 큰 원인이 되고 있는 연기에 대한 대응기술의 중요성이 강조되고 있다.

선진외국에서는 과거 대형 화재사고에서 발생한 인명피해의 주요 원인이 연기에 의한 것으로 검토되면서 건축물에서의 연기확산과 제어에 대한 체계적이고 다양한 연구를 수행하였으며, 이를 바탕으로 각 국의 상황을 반영하는 설계기술을 개발하여 왔다. 국내에서도 고층·복합 건축물

에서의 피난안전 확보와 소화활동 지원의 목적으로 거실과 피난계단에서의 연기제어 설계기준이 제시되고 있다. 그 중에서 NFSC 501A의 “특별피난계단의 계단실 및 부속실 제연설비의 화재안전기준”은 제연구역에 누설량을 급기하여 제연구역의 압력을 상승시키고 보충량에 의한 방연풍속을 형성함으로써, 제연구역으로의 연기침투를 방지하는 것을 주요 내용으로 하고 있다. 국내에서는 NFSC 501A의 기준을 충족하기 위하여 송풍기와 풍도 및 급기댐퍼를 사용하여 부속실의 압력을 높여주는 급기가압 제연시스템을 많이 설치하고 있다.

이와 같이 압력차를 이용하여 연기를 제어하는 제연시스템의 경우에는 건축물 내의 압력에 영향을 미치는 인자

들을 설계에 반영해야 한다. 그 중에서 동절기에 화재가 발생할 경우 연돌효과가 급기가압 제연시스템의 운전성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 연돌효과에 의해 건축물 내에 형성되는 압력차는 이론적으로 식(1)에 의해 구할 수 있다.

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

여기서 ΔP_{st} 는 연돌효과로 인한 압력차(Pa), g 는 중력가속도(m/s^2), h 는 측정점 높이(m), N 는 층상대 높이(m), T_i 는 실내온도(K), ρ_o 는 실외공기 밀도(kg/m^3)를 각각 나타낸다.

국내에서 연돌효과에 대한 연구는 2000년대 초반 고층 건축물이 증가하면서 본격적으로 수행되었으며, 건축분야에서 연돌효과에 대한 현장 실측과 실내환경에 미치는 영향 및 연돌효과와 저감 방안 등이 연구되었다⁽¹⁻³⁾. 한편 화재안전 분야에서는 수직 피난경로에서의 연돌효과에 대한 분석과 대응책 제시를 통해서 안전한 대피가 이루어 지는데 초점을 띤 연구가 많이 수행되었다. 김진수⁽⁴⁾ 등은 승강로와 거실 간의 차압을 줄이면서 승강로를 급기 가압함으로써 승강로의 연돌효과를 줄이는 방안을 제시하였고, 김정엽⁽⁵⁾ 등은 피난계단에서의 연돌효과를 저감하기 위해서 피난계단의 저층부에서 공기를 급기하고 고층부에서 배기하는 순환형 유동 시스템을 제안하였다. 또한 연돌효과가 피난계단의 급기가압 제연시스템에 미치는 영향과 개선점에 대한 연구가 수행되었다. 손봉세⁽⁶⁾ 등은 동절기의 연돌효과로 인해서 급기가압 제연시스템의 성능이 저하되거나 과압이 형성되어 상층부 피난문의 개방이 곤란해 질 수 있는 문제점을 제기하였으며, 이에 대한 해결방안으로 계단실 하부의 급기와 계단실·부속실 동시 가압 및 과압배출 댐퍼의 설치 등을 제안하였다. 김정엽⁽⁷⁾은 동절기와 하절기에 수행한 급기가압 제연시스템의 현장실험 결과를 분석하였고, 동절기에는 연돌효과와 급기가압 효과가 합쳐지면서 피난계단의 상층부 압력이 크게 상승하고 이로 인해서 부속실과 계단실 간에 과압이 형성되는 문제점을 제기하였다.

상기의 선행연구와 같이 연돌효과는 건축물의 실내환경이나 화재시 피난안전에 큰 영향을 미치고 있으며, 특히 수직 피난경로에서의 연기확산 방지와 제연시스템 성능에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 건축물에서 효과적인 제연시스템의 설계와 운영을 위해서는 연돌효과가 반영된 유동장 해석과 시스템 분석이 필요하다.

본 연구에서는 네트워크 모델을 기반으로 하는 수치해석적 방법을 이용해서 연돌효과가 포함된 피난계단에서의 급기가압 제연시스템을 분석하였으며, 층과 구획실별로 상세한 해석결과를 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 해석대상

본 연구에서는 20층 규모의 건축물을 해석대상으로 하

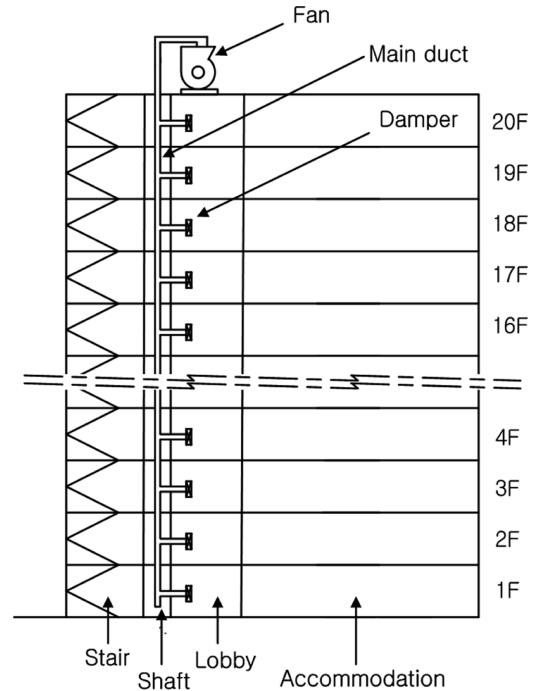


Figure 1. Schematic diagram of model building.

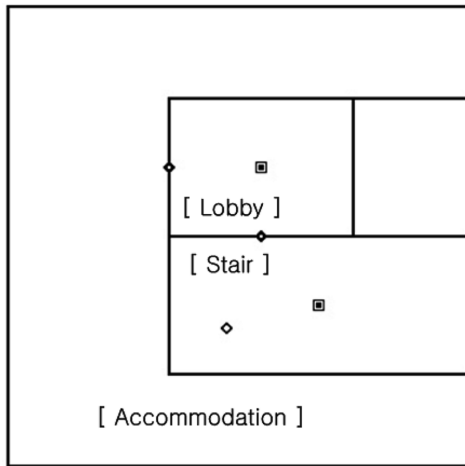
였으며, 부속실과 계단실 및 급기가압 제연시스템을 포함하는 특별피난계단 1식을 해석범위로 상정하였다. 구체적인 건축물 구조와 급기가압 제연시스템의 설계변수 등은 김정엽⁽⁸⁾ 등이 제시한 연구내용을 인용하였다.

즉, Figure 1과 같이 특별피난계단 1식이 포함된 20층의 건축물을 해석대상으로 하였으며, 제연구역을 부속실로 설정하고 부속실과 거실 사이의 설계차압은 50 Pa로 하였다. 각 구획실간 출입문의 누설면적을 $0.0107 m^2$ 로 가정하였을 때, 인용문헌에서와 같이 누설량은 $1.2698 m^3/s$ 가 된다. 본 연구에서는 각 층의 출입문이 모두 닫혀 있는 조건을 적용하였으며, 누설량을 송풍기에 의해 급기되는 유량으로 설정하였다.

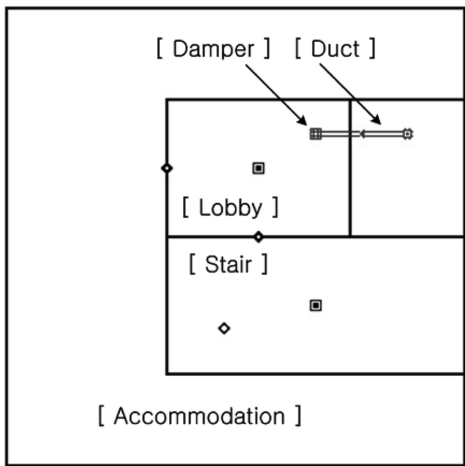
2.2 네트워크 모델 설정

본 연구에서는 연돌효과를 고려한 급기가압 제연시스템의 해석을 수행하기 위해서 네트워크 모델에 기반한 CONTAMW 3.1 프로그램⁽⁹⁾을 사용하였다. Figure 2는 CONTAMW로 작성한 한 개층의 전처리 구성도이다. Figure 2(a)는 건축물에서의 연돌효과만을 분석하기 위하여 급기가압 제연시스템을 제외하고 구성한 결과이며, Figure 2(b)는 급기가압 제연시스템을 포함하여 구성한 결과이다. 김정엽⁽⁸⁾ 등의 인용문헌에서와 같이 주요 구획실과 출입문은 각각 “Zone”과 “Airflow Element”로 처리하였고, 송풍기와 풍도 및 급기댐퍼로 구성되는 급기가압 제연시스템은 “Duct Segment”와 “Duct Junction” 기능을 이용하여 처리하였다.

한편 급기가압 제연시스템에서는 각층의 부속실과 거실



(a) without pressurization system



(b) with pressurization system

Figure 2. Floor plans of simulation model.

사이의 차압을 설계값으로 유지하기 위해서 일반적으로 자동차압·과압조절형 급기댐퍼를 적용하고 있다. 본 연구에서도 이러한 자동차압·과압조절형 급기댐퍼를 모델링하여 해석을 수행하였으며, 모델링 방법은 김정엽⁽⁸⁾ 등의 인용문헌에서 제시한 내용을 적용하였다. 즉, 부속실과 거실 사이의 차압이 조절되도록 댐퍼날개의 개도가 변화하는 동작은 다음의 식(2)와 같이 급기댐퍼 전후의 압력차와 유량 사이의 관계식으로 모델링되었다.

$$\Delta P_D = C_D \frac{\rho V_D^2}{2} \quad (2)$$

여기서 ΔP_D 는 급기댐퍼 전후의 압력차, C_D 는 동적 손실계수, V_D 는 급기댐퍼를 통과하는 유동의 평균속도를 나타낸다.

CONTAMW에서는 “Duct Junction” 모듈에 “Duct Terminal” 부모듈이 있으며 Duct Terminal의 동적 손실계수를 조절할 수 있다. 따라서 수치해석에서는 부속실과 거실 사이 차압이 설계값이 되도록 Duct Terminal의 동적 손실계수를 조절하는 방법으로 자동차압·과압조절형 급기

Table 1. Conditions of Numerical Analysis

| Case | Condition |
|--------|-----------------------------|
| Case 1 | Stack effect only |
| Case 2 | Pressurization only |
| Case 3 | Pressurization+Stack effect |

댐퍼의 동작을 모델링하였다.

2.3 수치해석 조건

본 연구에서는 연돌효과가 피난계단의 제연시스템에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 1에서와 같이 연돌효과만 작용하는 경우(Case 1), 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우(Case 2), 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우(Case 3)에 대해서 수치해석을 수행하였다. 연돌효과를 적용하기 위해서 실내온도를 20 °C로 설정하고, 실외온도를 -10 °C로 설정하였다.

3. 결과 및 검토

Figure 3에서 Figure 5는 각 Case에 대해서 각 층별로 구획실간 흐르는 공기 기류의 유량을 나타내고 있다. 그림에서 Line 1은 각 층의 부속실과 계단실 사이 출입문의 틈새로 흐르는 유량을 나타내며, 부속실에서 계단실 방향으로 흐름이 형성되는 경우에 양(+)의 값을 갖으며 반대방향인 경우 음(-)의 값을 갖는다. Line 2는 각 층의 부속실과 거실 사이 출입문의 틈새로 흐르는 유량을 나타내며, 부속실에서 거실 방향으로 흐름이 형성되는 경우에 양(+)의 값을 갖으며 반대방향인 경우 음(-)의 값을 갖는다. 한편 Line 3는 계단을 흐르는 기류의 유량을 나타내며, 아래층에서 위층 방향으로 흐름이 형성되는 경우에 양(+)의 값을

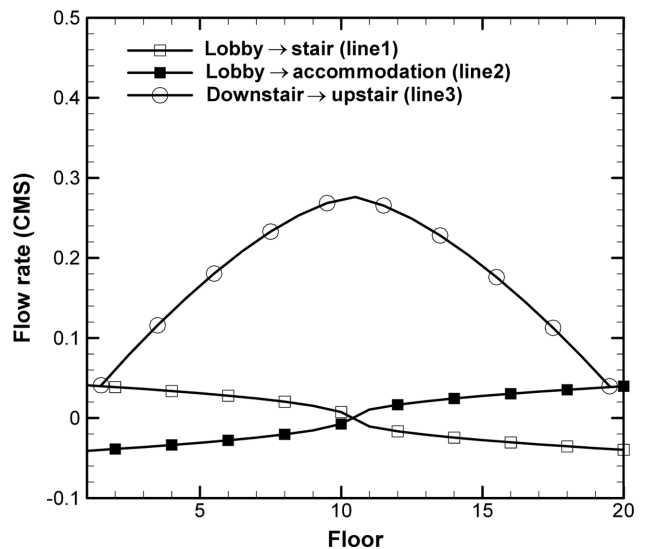


Figure 3. Distributions of flow rate for stack effect only.

갖는다.

Figure 3은 연돌효과만 작용한 경우(Case 1)에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 저층에서는 거실→부속실→계단실 방향으로 공기가 흐르고, 고층에서는 계단실→부속실→거실 방향으로 공기가 흐른다. 1층에서 유입되는 공기의 유량은 0.04090 m³/s가 된다. 저층에서 계단실로 유입된 공기는 고층으로 상승하게 되며, 각 층에서 유입된 공기가 더해져서 10층과 11층 사이에서는 0.27604 m³/s의 공기가 계단을 흐르게 된다. Figure 4는 급기가압 제연시스템만 작용한 경우(Case 2)에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 급기가압 제연시스템에서는 각 층의 부속실과 거실 사이에 50 Pa 정도의 차압이 형성되어야 하며, 그림에서와 같이 각 층마다 부속실에서 거실 방향으

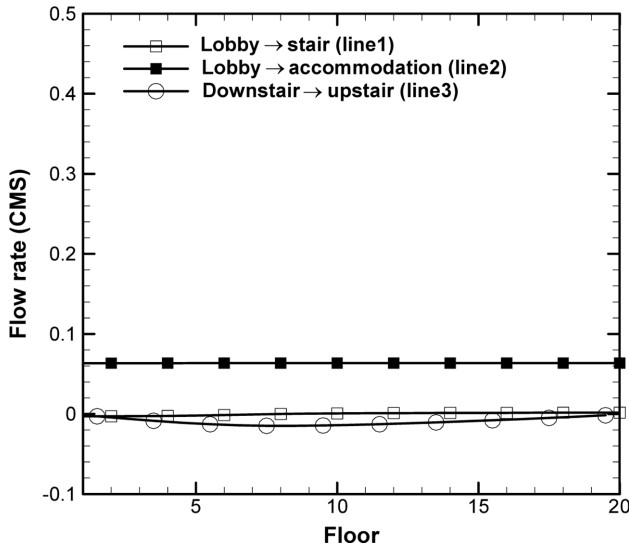


Figure 4. Distributions of flow rate for pressurization only.

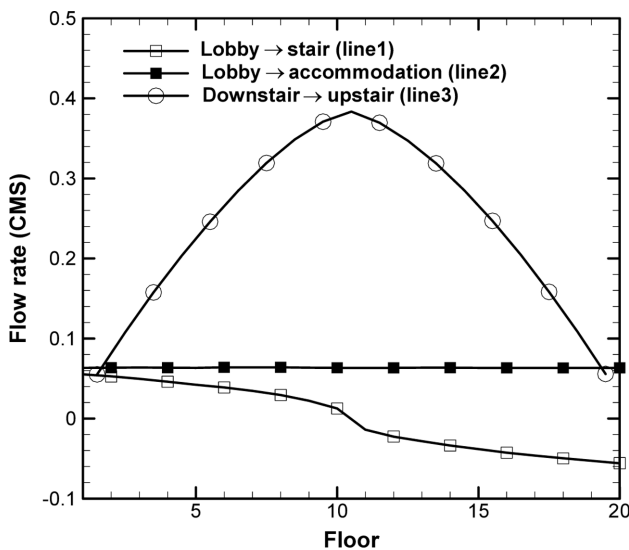


Figure 5. Distributions of flow rate for stack effect plus pressurization.

로 0.06349 m³/s 정도의 유량이 흐르게 된다. 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우에는 계단에 창문 등의 개구부가 없기 때문에 각 층의 계단실의 압력이 부속실과 거의 같은 수치로 형성되며, 부속실과 계단실 사이를 흐르는 공기의 유량은 미미한 수준이 된다. Figure 5는 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우(Case 3)에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우에도 각 층의 부속실과 거실 사이에 50 Pa 정도의 차압이 형성되어야 하므로, 그림에서와 같이 각 층마다 부속실에서 거실 방향으로 일정한 유량이 흐르게 된다. 한편 저층에서는 각 부속실로 급기되는 공기 중에서 일부가 연돌효과의 영향에 의해 계단실로 흐르게 되고, 고층에서는 저층에서 계단실로 상승한 공기가 부속실로 흐르게 된다. 1층에서 계단실로 유입되는 공기의 유량은 0.05527 m³/s가 된다. 한편 각 층에서 유입되어 10층과 11층 사이의 계단을 흐르는 공기의 유량은 0.38343 m³/s이 된다.

Figure 6에서 Figure 8은 해석결과 중 주요내용에 대해 각 Case별로 비교한 결과를 보여준다.

Figure 6은 급기가압 제연시스템의 주덕트에서 각 층의 부속실로 공급되는 급기 유량을 보여주고 있다. 그림에서 Line 1은 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우(Case 2)의 각 층별 급기 유량이고 Line 2는 연돌효과+급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우(Case 3)의 각 층별 급기 유량을 나타낸다. 그림에서와 같이 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우에는 각 층에서 거의 동일한 유량이 주덕트에서 부속실로 급기되고 있으나, 연돌효과가 같이 작용하는 경우에는 저층의 급기 유량이 증가하고 고층의 급기 유량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 연돌효과가 급기가압 제연시스템에 영향을 미칠 경우에, 저층에서는 부속실과 거실 사이의 차압을 형성하기 위해서 부속실에서 거실

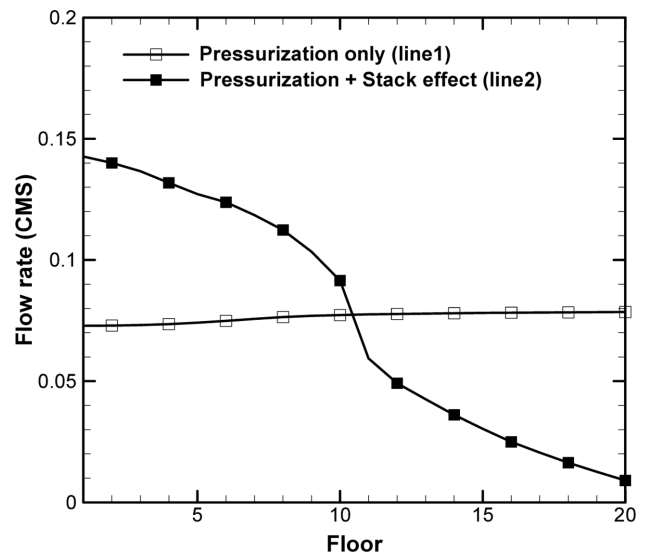


Figure 6. Distributions of flow rate through duct.

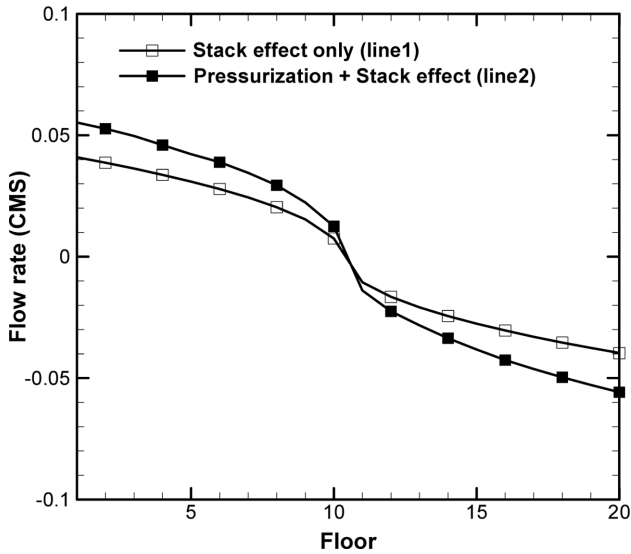


Figure 7. Distributions of flow rate through door between stair and lobby.

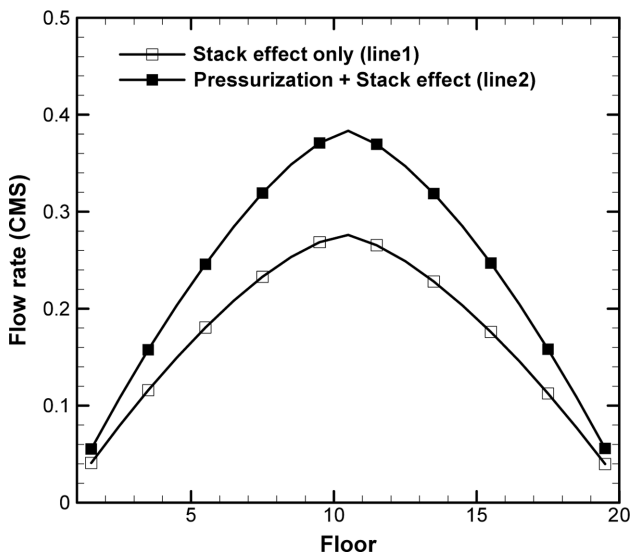


Figure 8. Distributions of flow rate through stairwell.

로 누설되는 유량과 연돌효과로 인해 부속실에서 계단실로 흐르는 유량을 합친 유량이 주덕트에서 부속실로 급기되기 때문이고, 고층에서는 부속실과 거실 사이의 차압을 형성하기 위해 부속실에서 거실로 누설되는 유량과 계단실에서 부속실로 흐르는 유량의 차에 해당하는 유량이 주덕트에서 부속실로 급기되기 때문이다.

Figure 7과 Figure 8은 계단실과 부속실 사이 출입문의 틈새로 흐르는 유량 및 계단을 흐르는 유량을 각각 보여주고 있다. 각 그림에서 Line 1은 연돌효과만 작용하는 경우(Case 1)이고 Line 2는 연돌효과+급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우(Case 3)이다. 그림에서와 같이 연돌효과만 작용하는 경우보다 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우에 계단실과 부속실 사이 출입

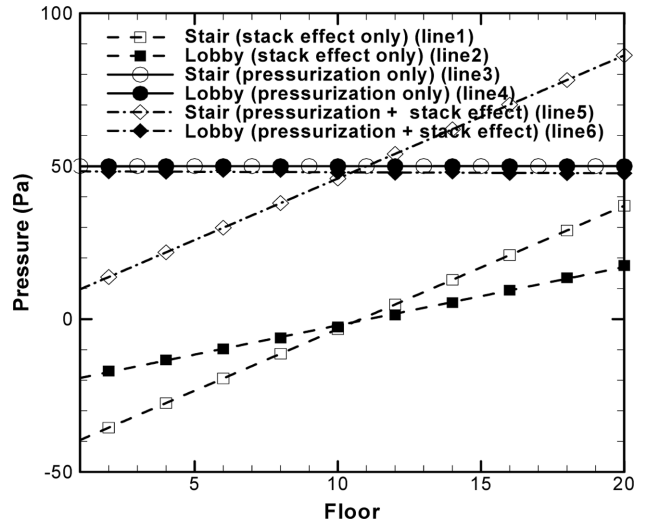


Figure 9. Distributions of pressure in compartments at each floor.

문의 틈새로 흐르는 공기 유량이 증가하고 따라서 계단실로 상승하는 공기 유량도 많아진다.

Figure 9는 각 Case에 대해서 각 층별로 계단실과 부속실에 형성되는 압력을 나타내고 있다. 그림에서 Line 1과 Line 2는 연돌효과만 작용하는 경우(Case 1)이고, Line 3과 Line 4는 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우(Case 2)이며, Line 5와 Line 6은 연돌효과+급기가압 제연시스템이 동시에 작용한 경우(Case 3)이다. 그림에서와 같이 연돌효과만 작용하는 경우, 저층에서는 부속실과 계단실에 부압이 형성되고 “부속실 압력>계단실 압력”의 순이 된다. 고층에서는 부속실과 계단실에 양압이 형성되고 “부속실 압력<계단실 압력”의 순이 된다. 이 때 20층에서는 계단실의 압력이 약 37.0 Pa, 부속실의 압력이 약 17.5 Pa로서 구획공간 압력차가 약 19.5 Pa 정도 형성된다. 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우, 모든 층의 부속실과 계단실은 50 Pa로 동일하게 압력이 형성된다.

한편 Figure 9에서 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우의 계단실 압력은 연돌효과만 작용하는 경우의 계단실 압력과 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우의 계단실 압력을 합한 값과 거의 같다. 즉 Line 5의 값은 Line 1의 값과 Line 3의 값을 합한 값이 되는 것이다. 또한 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우, 모든 층의 부속실에서는 50 Pa 근처로 동일하게 압력이 형성된다. 이때 20층에서는 계단실의 압력이 약 86.2 Pa로서 20층의 계단실과 부속실 사이 압력차가 약 38.6 Pa 정도 형성된다.

상기와 같이 Figure 9의 결과를 검토해 보면, 연돌효과만 작용하는 경우에 형성되는 계단실과 부속실 사이 압력 차에 비해서 연돌효과+급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우에 형성되는 계단실과 부속실 사이 압력차가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 연돌효과와 급기가압 효

과가 합쳐져서 계단실의 압력이 상승하기 때문인데, 연돌 효과만 작용하는 경우에 계단을 흐르는 유량에 비해 연돌 효과+급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우에 계단을 흐르는 유량이 증가하는 것도 같은 현상으로 이해할 수 있다. 따라서 동절기에 급기가압 제연시스템이 운전될 경우에는 계단실과 부속실 사이에 형성되는 압력차가 출입문의 개방에 영향을 미칠 수 있는 지에 대한 검토가 반드시 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 네트워크 모델을 기반으로 하는 수치해석적 방법을 이용해서 20층 규모의 건축물 피난계단에서 연돌효과가 포함된 급기가압 제연시스템의 운전 특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연돌효과만 작용하는 경우 저층에서는 거실→부속실→계단실 방향으로 공기가 흐르고 고층에서는 계단실→부속실→거실 방향으로 공기가 흐르며, 저층에서 계단실로 유입된 공기는 고층으로 상승한다.

(2) 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우 각 층의 계단실의 압력이 부속실과 거의 같은 수치로 형성되며, 부속실과 계단실 사이를 흐르는 공기의 유량은 미미한 수준이 된다.

(3) 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우 저층에서는 각 부속실로 급기되는 공기 중에서 일부가 연돌효과의 영향에 의해 계단실로 흐르게 되고, 고층에서는 저층에서 계단실로 상승한 공기가 부속실로 흐른다.

(4) 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우에는 각 층에서 거의 동일한 유량이 주덕트에서 부속실로 급기되나, 연돌효과가 같이 작용하는 경우에는 저층의 급기 유량이 증가하고 고층의 급기 유량이 감소한다.

(5) 연돌효과만 작용하는 경우보다 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우에 계단실과 부속실 사이 출입문의 틈새로 흐르는 공기 유량이 증가하고 따라서 계단실로 상승하는 공기 유량도 많아진다.

(6) 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우의 계단실 압력은 연돌효과만 작용하는 경우의 계단실 압력과 급기가압 제연시스템만 작용하는 경우의 계단실 압력을 합한 값과 같다.

(7) 연돌효과만 작용하는 경우에 형성되는 계단실과 부속실 사이 압력차에 비해서 연돌효과와 급기가압 제연시스템이 동시에 작용하는 경우에 형성되는 계단실과 부속실 사이 압력차가 증가한다. 이는 연돌효과와 급기가압 효과가 합쳐져서 계단실의 압력이 상승하기 때문이다.

(8) 동절기에 급기가압 제연시스템이 운전될 경우에는 계단실과 부속실 사이에 형성되는 압력차가 출입문의 개

방에 영향을 미칠 수 있는 지에 대한 검토가 반드시 필요하다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “(13주요) 대공간의 대용량 연기제어 설비기술 개발” 과제에 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

1. J. H. Jo, I. H. Yang, M. S. Yeo and K. W. Kim, “A Case Study on the Field Measurement and Reduction of the Stack Effect in High-rise Buildings”, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 18, No. 7, pp. 169-176 (2002).
2. I. H. Yang, M. S. Yeo, J. H. Jo and K. W. Kim, “Simulation of the Stack Effect in High-Rise Buildings”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 456-467 (2002).
3. K. H. Lee, S. M. Kim and Y. H. Park, “A Study on the Air Tightness Performance and Stack Effect Characteristics in High-Rise Apartments”, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 21, No. 12, pp. 279-286 (2005).
4. J. S. Kim and E. P. Lee, “Study on the Method of Stack Effect Mitigation by the Elevator Shaft Pressurization at High-rise Buildings”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 178-183 (2011).
5. J. Y. Kim and H. J. Shin, “A Study on Reduction Method of Stack Effect at Stairwell of High-Rise Building”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 14-20 (2011).
6. B. S. Son and J. S. Kim, “A Study on Performance Improvement Measures of Pressurized Smoke Control Systems for Exit Passageways of High-Rise Buildings”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 12., pp. 703-714 (2009).
7. J. Y. Kim, “Field Experiment on Influence of Stack Effect to Pressure Differential System for Smoke Control”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 194-200 (2008).
8. J. Y. Kim and H. J. Shin, “Numerical Analysis on Pressurization System of Smoke Control in Consideration of Flow Rate of Supply and Leakage”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 87-93 (2010).
9. NIST, “CONTAMW Ver.3.1” (2013).