

고층건물 피난계단에서의 연돌효과 저감방안 연구 A Study on Reduction Method of Stack Effect at Stairwell of High-Rise Building

김정엽[†] · 신현준

Jung-Yup Kim[†] · Hyun-Joon Shin

한국건설기술연구원 화재안전연구소
(2011. 5. 31. 접수/2011. 9. 14. 수정/2011. 10. 7. 채택)

요 약

건축물이 고층화되면서 피난을 위한 주요 시설인 피난계단에서는 수직적 구조로 인해 연돌효과의 영향이 크게 발생하고 있다. 동절기에 연돌효과로 인한 계단실의 압력상승으로 피난문을 열고 대피하는데 어려움이 있고, 피난계단의 연기안전을 위한 급기가압 제연시스템의 운전성능에 교란이 발생되기 때문에 피난계단에서의 연돌효과를 저감시켜야 더욱 안전한 대피환경을 제공할 수 있다. 본 연구에서는 고층 건물에서의 현장실험을 통해 피난계단에서의 연돌효과를 저감시킬 수 있는 방안을 도출하였고, 네트워크 모델을 사용한 수치해석을 수행하여 정량적이고 상세한 설계방안을 제시하였다. 현장실험 결과 피난계단의 저층부에서 피난계단으로 공기가 급기되고 고층부에서 피난계단의 외부로 공기가 배기되도록 공기의 흐름을 생성시켜 준다면 고층 건물의 피난계단에서의 연돌효과가 저감될 것으로 예측된다.

ABSTRACT

As the height of the building increases, the stack effect in stairwell that is main facilities for evacuation becomes stronger. While the pressure rise in stairwell causes difficulties on opening the door for evacuation and has effect on smoke control system, reduction of stack effect will be necessary for providing more safe evacuation environment. The field experiments on pressure field in high-rise building are carried out to present reduction method of stack effect and the numerical analyses using network model are proceeded to design quantitatively the reduction method. As the air flow supplied from outside in lower stair and exhausted to outside in upper stair is formed in stairwell, the stack effect in stairwell is expected to be decreased.

Key words : Stack effect, High-rise building, Stairwell, Network model

1. 서 론

도시가 고도화·집적화되면서 건축물의 고층화가 급속히 진행되고 있다. 건축물이 고층화되면서 계단과 엘리베이터 샤프트 등의 수직통로를 중심으로 연돌효과가 발생하여 동일층의 실간 압력차가 커지고 이로 인해 실내환경 악화, 출입문·엘리베이터 오작동 및 에너지 손실 등 고층 건축물 내 많은 문제점이 야기되고 있다.

화재 시 재실자의 안전을 확보하기 위한 피난과 제

연시설의 경우도 시스템을 성공적으로 설계하고 운영하기 위해서는 연돌효과의 영향을 반영하고, 경우에 따라서 이를 제어해야 한다. 피난을 위한 주요 시설인 피난계단은 수직적 구조로 인해 연돌효과의 영향이 크게 발생하며, 수직피난로의 연기안전을 확보하는 급기가압 제연시스템은 구획실간 압력차를 이용하여 연기를 제어하기 때문에 연돌효과에 의해 형성되는 건축물 내 압력특성을 고려해야 한다.

연돌효과에 의한 이론적인 압력차는 다음의 식(1)에 의해 계산될 수 있다.

$$\Delta P_{st} = g(h - h_{np})\Delta\rho = g(h - h_{np})\rho_i(T_i - T_o)/T_o \quad (1)$$

[†]E-mail: jykim1@kict.re.kr

여기서,

- ΔP_{st} : 연돌효과로 인한 압력차(Pa)
- g : 중력가속도(m/s^2)
- h : 측정점의 높이(m)
- h_{npl} : 중성대의 높이(m)
- T_i : 실내온도(K)
- T_o : 실외온도(K)
- ρ_i : 실내공기의 밀도[kg/m^3]

지금까지 건축물에서의 연돌효과에 대한 분석과 개선방향에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 현장실험을 통해 업무시설로 사용되고 있는 지상 39층의 건물을 대상으로 연돌효과에 의한 압력변화가 측정·분석되었으며 연돌효과로 인한 문제점 및 이의 보완조치가 검토되었고,¹⁾ 고층건물에서의 연돌효과에 영향을 미치는 건축적 인자들이 선정되어 네트워크 모델의 시뮬레이션이 수행되고 인자들의 영향이 정량적으로 평가되었다.²⁾ 한편 주거용 고층건물이 증가하면서 주거형의 건축·설비적 특성을 가지는 국내 건물을 대상으로 연돌효과에 의한 영향이 실제 측정과 시뮬레이션을 통해 규명되었다.^{3,4)} 또한 31층 규모 건물에서의 현장실험을 통해 연돌효과가 커지는 동절기에 급기가압제연시스템을 가동하면 계단실에서는 연돌효과와 함께 부속실에서의 누기현상이 합쳐지면서 계단실과 부속실 간 차압이 증가하고 이로 인해 화재발생 시 피난을 하는 재실자가 피난문을 개방하는 데 문제가 발생할 수 있음이 알려졌다.⁵⁾

이러한 선행연구 내용과 더불어 고층건물의 피난계단에서의 연돌효과 영향을 분석하고 안전한 피난환경을 제공하기 위해서 연돌효과를 효과적으로 제어할 수 있는 방안에 대한 검토가 수행되어야 한다. 즉 기존 연구에서 연돌효과에 대한 개선방안으로 주로 언급된 건축적 방안과 함께 피난계단에서의 연돌효과에 대한 능동적이고 정량적인 제어를 위한 설비적 방안을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 현장실험을 통해 피난계단에서의 연돌효과를 저감시킬 수 있는 유용한 방안을 도출하였고, 네트워크 모델을 사용한 수치해석을 수행하여 정량적이고 상세한 설계방안을 제시하였다.

2. 현장실험

본 연구에서는 연돌효과가 크게 발생하는 동절기에 Figure 1과 같이 31층의 고층 건물을 대상으로 피난계단(Stair)의 저층에서 고층까지 일정간격으로 압력센서

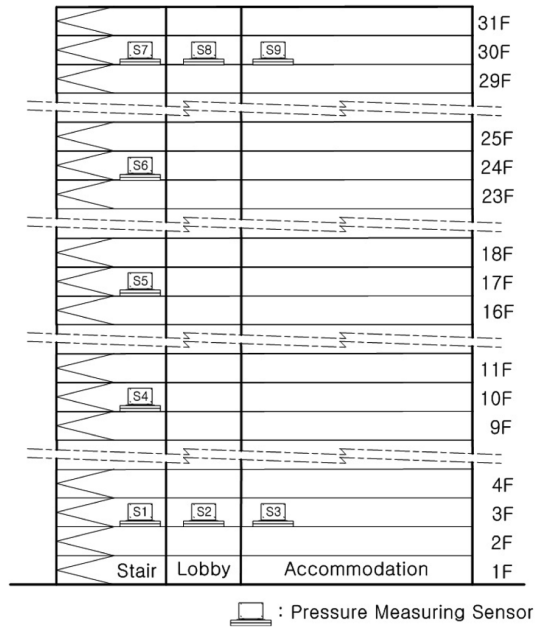


Figure 1. Schematic diagram of experimental layout.



Figure 2. Photograph of pressure sensor.

를 설치하였으며, 저층인 3층과 고층인 30층은 피난계단과 연결된 부속실(Lobby), 거실(Accommodation)에서도 압력을 동시에 계측할 수 있도록 하였다. Figure 2는 피난계단에서 형성되는 압력을 측정하기 위해 피난계단에 설치한 압력계를 보여주고 있다.

실험조건은 Table 1과 같이 전층의 피난문을 닫은 상태(CASE1), 1층의 피난계단과 부속실의 피난문을 개방한 상태(CASE2) 및 1층과 31층의 피난계단, 부속실 피난문을 개방한 상태(CASE3)에서 각 측정위치의 압

Table 1. Conditions of Experiment

Case	Condition
CASE1	All doors are closed
CASE2	Doors on the 1st floor are opened. Others are closed
CASE3	Doors on the 1st and 31th floor are opened. Others are closed

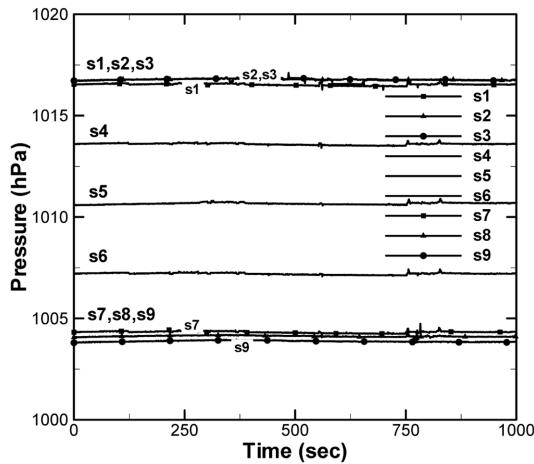


Figure 3. Pressure variations for CASE1.

력변화를 계속하였다. CASE2와 CASE3과 같이 피난계단과 부속실의 피난문을 개방하면 계단실과 계단실 외부사이에 공기가 흐르는 유로가 형성되고 각 층의 실간 압력조건에 따라 계단실 쪽으로 공기가 흐르거나 계단실에서 계단실 외부로 공기가 배출된다.

Figure 3은 CASE1의 실험조건 즉, 모든 피난문이 닫혀져 있을 때의 실험결과로서 X축은 계속시간을 나타내고 있으며, Y축은 계속시간에 따른 각 압력센서 위치에서의 실내압력 변동값을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 각 위치에서의 압력값은 큰 변동이 없이 일정한 수준을 유지하고 있으며 저층에서 고층으로 올라갈수록 피난계단에서의 대기압이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. CASE1의 경우 저층인 3층에서는 “피난계단 압력 < 부속실 압력 < 거실 압력”의 순으로 압력이 형성되고, 고층인 30층에서는 “피난계단 압력 > 부속실 압력 > 거실 압력”의 크기로 실내압력이 형성된다. 이러한 측정결과로부터 피난계단 내 연돌효과의 영향으로 저층에서는 거실로부터 피난계단으로 공기흐름이 형성되고 이러한 공기가 고층으로 상승하여 고층에서는 피난계단에서 부속실로 그리고 부속실에서 거실로

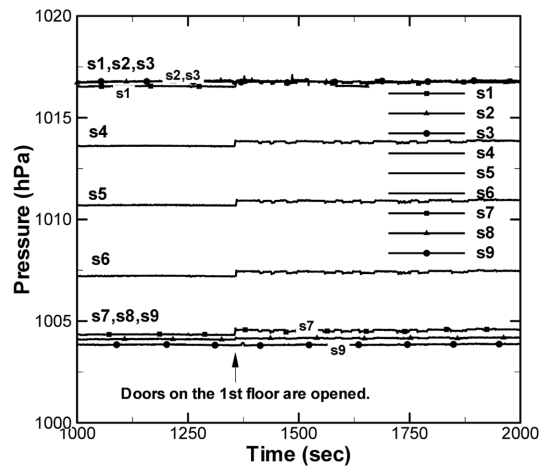


Figure 4. Pressure variations for CASE2.

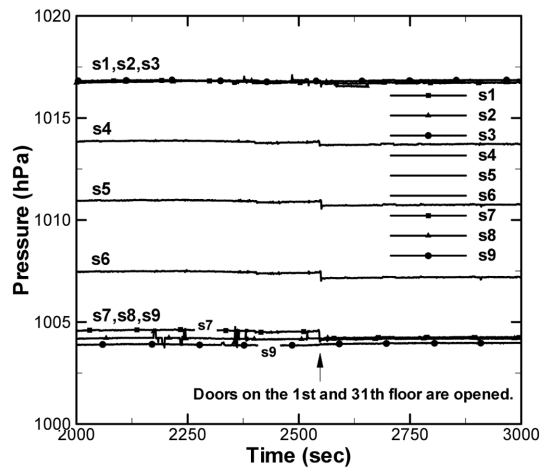


Figure 5. Pressure variations for CASE3.

유동이 형성되는 것을 알 수 있다. 대상 건물에서는 피난문이 전부 닫혀져 있는 상태에서 연돌효과로 인해 30층에서는 피난계단과 부속실간 차압이 약 23 Pa 정도 형성되고 있다.

Figure 4는 CASE1에서 CASE2의 실험조건으로 변경하면서 시간에 따른 압력분포를 보여주고 있다. 즉 약 1,350초에서 1층의 거실과 피난계단을 연결하는 2개의 피난문을 개방하면서 각 위치에서의 변화되는 압력을 도시하였다. 그림에서와 같이 피난계단의 각 층에서 압력이 문을 개방하면서 상승하고 있음을 알 수 있다. 이는 1층의 피난문이 개방되면서 거실의 공기가 피난계단으로 유입되고 유입된 공기가 상승하면서 피

난계단내 압력을 상승시키는 것으로 판단된다. 이로 인해 고층인 30층에서는 피난계단과 부속실을 연결하는 피난문에 작용하는 압력이 크게 상승하여 피난문의 개방이 더 힘들어지는 현상을 유발한다. Figure 5는 CASE2에서 CASE3으로 실험조건이 바뀌면서 각 위치에서의 압력변화를 보여주고 있다. 1층의 피난문이 개방된 상태에서 31층의 피난문을 추가로 개방할 경우에 변화하는 압력값의 추이를 살펴보면 다음과 같다. 피난계단의 압력이 31층의 피난문을 개방하면서 낮아지며 고층으로 올라갈수록 하강폭이 커진다. 그로인해 30층 피난계단에서의 압력은 CASE1의 실험조건, 즉 전층의 피난문을 닫았을 때보다 더 낮아지고 31층의 피난계단과 부속실간 압력차도 더 작아진다. 즉, 1층에서 유입된 공기가 31층으로 유출되면서 피난계단 내 압력이 하강하는 것이다.

Figure 6은 CASE1, CASE2 및 CASE3로 실험조건이 변하면서 3층과 30층의 피난계단과 부속실, 부속실과 거실 간 압력차의 변동치를 나타내고 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 모든층의 피난문이 닫혀져 있을 때 연돌효과와의 영향으로 3층에서는 부속실에서 피난계단 방향으로 피난문에 약 21 Pa의 압력이 작용하고 30층에서는 피난계단에서 부속실방향으로 약 23 Pa, 부속실에서 거실방향으로 약 27 Pa의 압력이 작용이 작용한다.

그리고 1층의 피난문만 개방되면 고층부에는 연돌효과가 커져서 30층의 피난계단에서는 부속실 방향으로 작용하는 압력이 약 23 Pa에서 약 38 Pa로 상승하고 있다. 한편 1층의 피난문 개방에 더하여 31층 피난문이 함께 개방되면 연돌효과가 줄어들면서 30층의 피난계

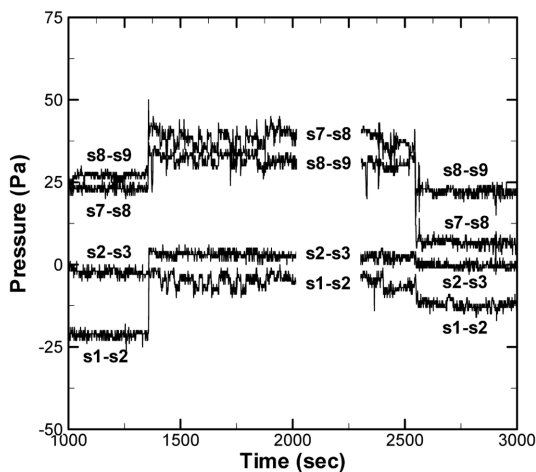


Figure 6. Variations of pressure differential between each compartment.

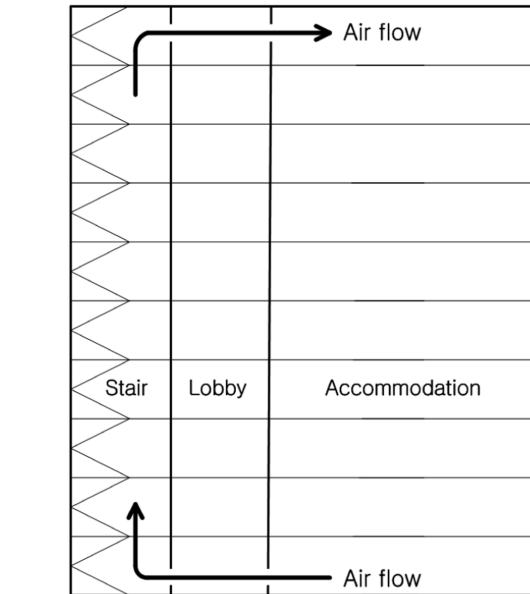


Figure 7. Air flow in stairwell for reduction of stack effect.

단에서는 부속실방향으로 작용하는 압력이 약 7 Pa로 크게 하강하고 있다.

상기 실험결과에서 주목할 점은 피난문이 모두 닫혀 있는 경우에 비해서 1층과 31층의 피난문이 개방되어 있을 때 피난계단에서의 연돌효과가 크게 감소하고 있다는 점이다. 즉, 피난문이 모두 닫혀있는 경우에 비해서 1층과 31층의 피난문이 개방되면 고층부인 30층에서 “계단압력과 부속실압력의 차(s7-s8)”가 23 Pa에서 7 Pa로 감소하였고 저층부인 3층에서도 “계단압력과 부속실압력의 차(s1-s2)”가 -21 Pa에서 -12 Pa로 차이가 줄어든 것이다. 이러한 분석결과로부터 Figure 7과 같이 피난계단의 저층부에서 피난계단으로 공기가 급기되고 고층부에서 피난계단의 외부로 공기가 배기되도록 공기의 흐름을 생성시켜 준다면 고층 건물의 피난계단에서의 연돌효과가 저감될 것으로 예측할 수 있다.

3. 연돌효과 저감방안

본 연구에서는 피난계단의 저층부에서 고층부로 공기의 흐름을 생성시키면 연돌효과가 감소된다는 현장실험의 결과를 공학적으로 적용하기 위하여 Figure 8과 같은 방안을 고안하였다. 구체적 내용은 그림에서와 같이 수직풍도와 송풍기를 이용하여 피난계단의 저층부에서 급기그릴을 통해 공기를 급기하고 고층부에서 배기그릴을 통해 배기하는 순환형 연돌효과 저감방안이다.

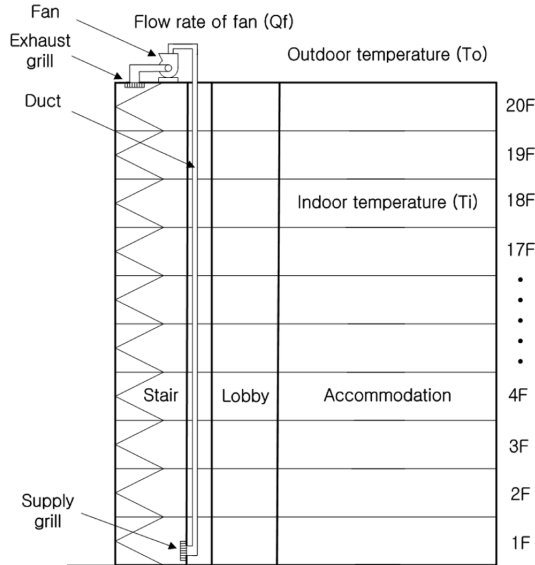


Figure 8. Schematic diagram of reduction method of stack effect at stairwell.

이러한 순환형 연돌효과 저감방안이 실제로 고층건물에 적용되기 위해서는 실내의 온도차, 건물 높이, 송풍기 풍량 등 설계인자를 고려하면서 피난계단에서의 연돌효과 저감수치에 대한 정량적인 설계방안의 제시가 필요하다.

본 연구에서는 네트워크 모델의 수치해석기법을 사용하여 순환형 연돌효과 저감방안에 대한 해석을 수행하였다. 이를 위한 연구대상의 모델 건물은 Figure 8과 같이 지상 20층의 건물로서 피난계단과 송풍기, 수직덕트를 포함하도록 하였다. 해석프로그램은 미국 NIST에서 개발한 CONTAMW2.4를 사용하였다.⁶⁾

해석을 위한 온도조건으로는 실내온도, T_i 를 20°C로 설정하고 실외온도, T_o 를 -20°C(253 K), -10°C(263 K), 0°C(273 K), 10°C(283 K)로 하여 실내의 온도차를 변하게 하였다. 각각의 실내의 온도차에 대하여 순환형 연돌효과 저감방안의 송풍기 풍량, Q_f 을 0.0 m³/s에서 5.0 m³/s 까지 달리해가며 20층 계단에서 생성되는 압력을 도출하였다. 20층 계단에서의 압력차, ΔP_{20F} 는 20층 계단의 압력과 실외압력의 차이를 의미한다.

Figure 9는 수치해석의 결과로서 실외온도와 송풍기 풍량에 따른 산출값을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 ΔP_{20F} 실내의 온도차가 적을수록 20층 계단에서의 압력이 감소하며 송풍기 풍량이 증가할수록 역시 ΔP_{20F} 가 낮아진다. 즉 실내의 온도가 적을수록 건물 내 작용하는 연돌효과가 줄어들며 순환형 연돌효과 저감방

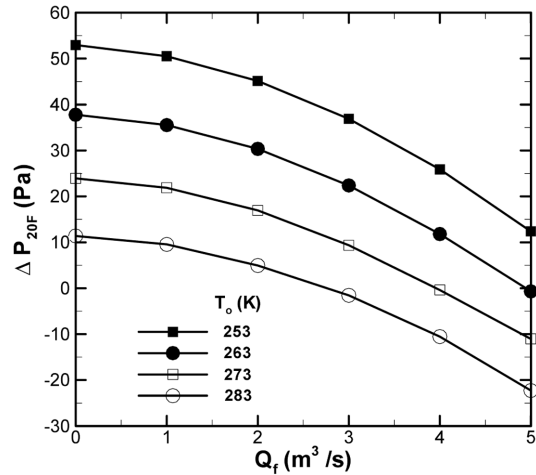


Figure 9. Numerical analysis results for ΔP_{20F} .

안의 송풍기 풍량이 증가할수록 연돌효과에 대한 저감능력이 커지는 것을 알 수 있다.

Figure 9에서 ΔP_{20F} 는 송풍기 풍량의 증가에 따라 2차원 곡선의 형태로 감소하고 있으며, 또한 실내의 온도차에도 영향을 받고 있다. 따라서 ΔP_{20F} 는 다음의 식(2)와 같이 구해질 수 있다.

$$\Delta P_{20F} = \Delta P_{st} - C_1 Q_f^2 (T_i - T_o) / T_o \quad (2)$$

여기서, ΔP_{st} 는 연돌효과에 의해 발생하는 압력차(Pa)로서 식(1)과 같으며, C_1 은 계수이다.

식(2)의 우변 두 번째 항에서 C_1 을 제외한 나머지 수식을 식(3)과 같이 P_f 로 한다.

$$Q_f^2 (T_i - T_o) / T_o = P_f \quad (3)$$

그러면 식(2)는 식(4)와 같이 정리할 수 있고 식(5)와 식(6)으로 더욱 간략화 할 수 있다.

$$\Delta P_{20F} = \Delta P_{st} - C_1 P_f \quad (4)$$

$$C_1 P_f = \Delta P_{st} - \Delta P_{20F} = P_y \quad (5)$$

$$P_y = C_1 P_f \quad (6)$$

수치해석 결과를 이용해서 식(6)의 관계를 그래프로 도시하면 Figure 10과 같다. 그림에서와 같이 P_y 와 P_f 는 선형적으로 대응하고 있으므로 C_1 은 실외온도가 정해지면 상수(Constant)로 판단할 수 있다. Figure 10에서 Curve Fitting에 의해 실외온도, T_o 에 대응하는 C_1 을 구하면 Table 2와 같고, 이를 그래프로 표시하면 Figure 11과 같다. 그림에서와 같이 C_1 은 실외온도에 대해 이

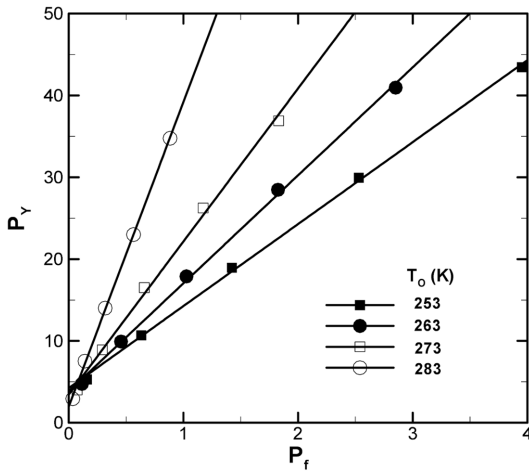


Figure 10. Relation of P_f and P_y .

Table 2. C_1 Obtained from Curve Fitting

T_o (K)	T_i (K)	C_1
253	293	10.02
263		13.20
273		18.71
283		37.20

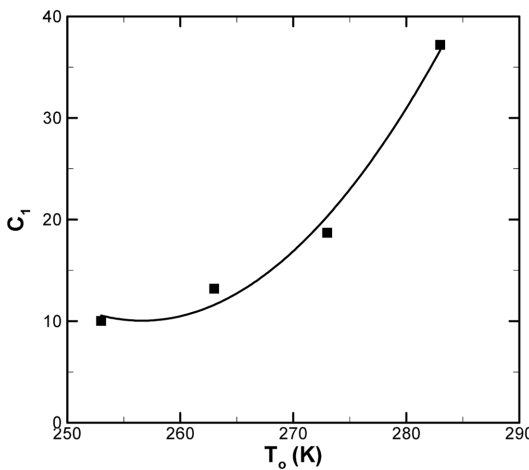


Figure 11. Relation of C_1 and T_o .

차원적 관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 31층 규모의 고층 건물에서의 현장실

험을 통해 피난계단에서의 연돌효과를 저감시킬 수 있는 방안을 도출하였고, 정량적인 설계방안의 제시를 위하여 네트워크 모델을 사용한 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 피난계단의 모든층의 피난문이 닫혀져 있을 때 저층인 3층에서는 부속실에서 피난계단방향으로 피난문에 약 21 Pa의 압력이 작용하고 고층인 30층에서는 피난계단에서 부속실방향으로 약 23 Pa, 부속실에서 거실방향으로 약 27 Pa의 압력이 작용이 작용한다.

2) 1층의 피난문이 개방되면서 30층의 피난계단에서 부속실방향으로 작용하는 압력이 약 23 Pa에서 약 38 Pa로 상승한다. 한편 1층의 피난문과 31층 피난문이 함께 개방되면 30층의 피난계단에서 부속실방향으로 작용하는 압력이 약 7 Pa로 크게 하강한다.

3) 1층의 피난문만 개방되면 고층 피난계단에서의 연돌효과에 의한 압력 상승폭이 커지고, 1층과 31층의 피난문이 동시에 개방되면 고층 피난계단에서의 압력 상승폭이 적어진다.

4) 피난계단의 저층부에서 피난계단으로 공기가 급기 되고, 고층부에서 피난계단의 외부로 공기가 배기 되도록 공기의 흐름을 생성시켜 준다면 고층 건물의 피난계단에서의 연돌효과가 저감될 것으로 예측된다.

5) 수직풍도와 송풍기를 이용하여 피난계단의 저층부에서 급기그릴을 통해 공기를 급기하고 고층부에서 배기그릴을 통해 배기하는 순환형 연돌효과 저감방안이 제시되었다.

6) 네트워크 모델의 수치해석을 통해 실내의 온도차, 건물 높이, 송풍기 풍량 등 설계인자가 반영된 순환형 연돌효과 저감방안의 연돌효과 저감량이 정량적으로 계산되었다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “(11주요) 성능기반 화재안전 선진화 연구” 과제와 관련한 연구에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 조재훈, 양인호, 여명석, 김광우, “사례연구를 통한 고층건물에서의 연돌효과 실측 및 저감방안”, 대한건축학회논문집(계획계), Vol.18, No.7, pp.169-176(2002).
2. 양인호, 여명석, 조재훈, 김광우, “고층건물에서의 연돌효과 시뮬레이션”, 설비공학논문집, Vol.14, No.6, pp.456-467(2002).
3. 이광호, 김상인, 박용후, 문장수, 손장열, “초고층 주

- 상복합아파트의 기밀 성능 및 연돌 효과 특성에 관한 연구”, 대한건축학회논문집(계획계), Vol.21, No.12, pp.279-286(2005).
4. 조재훈, “고층 주거건물에서의 압력분포 시뮬레이션 및 압력차 문제 해결”, 대한건축학회논문집(계획계), Vol.21, No.11, pp.269-276(2005).
 5. 김정엽, “연돌효과가 급기가압 제연시스템에 미치는 영향에 대한 현장실험”, 한국화재소방학회논문집, Vol.22, No.3, pp.194-200(2008).
 6. NIST, CONTAMW 2.4 User Guide and Program Documentation(2008).