

건축물 계단에서의 연돌효과 저감방안에 대한 3차원 수치해석 연구

Study on 3D Numerical Analysis of Stack Effect Reduction in Stairwell of Building

김정엽(Jung-Yup Kim)[†], 김지석(Ji-Seok Kim)

한국건설기술연구원 화재안전연구소

Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Koyang, 411-712, Korea

(Received December 17, 2014; revision received January 23, 2015; Accepted: January 26, 2015)

Abstract Stack effect on high-rise building have negative effect on living environment, energy and life-safety aspect. Thus, it's necessary to find the measure to reduce the stack effect. As a result of field test on a 31-story building, a circulating type stack effect reduction technology was developed, which supplies air in the low stairs and discharges air in the high stairs. To evaluate the performance of this circulating type stack effect reduction technology on building stairs, a 3D numerical analysis was carried out by using Momentum Loss Model for analyzing leakage flow between compartments in a building. Consequently, numerical analysis proved that the stack effect on building stairs was reduced by a circulating type stack effect reduction technology.

Key words Stack effect(연돌효과), High-rise building(고층건물), Pressure difference(압력차), Momentum loss model(운동량 손실 모델), Numerical analysis(수치해석)

[†] Corresponding author, E-mail: jykim1@kict.re.kr

1. 서 론

도시가 고도화·집적화되면서 건물의 고층화·대형화 및 복합화가 급격히 진행됨에 따라 고층 건물이 증가하고 있다. 한국에서도 이러한 추세가 반영되고 있으며, Table 1과 같이 과거 5년간 매년 800~1,000 동의 고층 건물이 건설되고 있어 고층 건물의 에너지·환경·방재 분야의 성능 확보를 위한 대책이 요구되고 있다.

고층 건물에서는 동절기에 실내와 실외의 온도차로 인하여 계단이나 승강기 통로와 같은 수직통로에 공기가 상승하는 연돌효과가 발생한다. 연돌효과로 인하여 Fig. 1과 같이 고층 건물의 하부층에서는 외부공기가 실내로 침입하고 상부층에서는 실내공기가 외부로 유출된다. 또한 각 층에서는 실외와 실내 사이 및 실내의 구획실간에 압력차가 발생하게 된다. 이와 같이 연돌효과로 인해서 유동이 발생하고 구획실간 압력차가 형성되면, 고층 건물의 거주환경과 에너지 및 방재 측면에서 악영향이 발생하게 된다. 일례로 연돌효과로 인해 고층 건물의 난방 에너지가 5~10% 정도 손실되는 것으로 평가되고 있다. 또한 거주환경 측면에서는 출입문의 개폐가 곤란하거나 승강기의 오작동이 발생할 수 있으며, 피난문이나 승강기문의 틈새로 고주파의

소음이 발생하여 심야시간대에 심각한 문제를 야기하기도 한다. 따라서 고층 건물에서 에너지와 환경 성능의 개선을 위해서는 연돌효과에 대한 제어기술 개발과 저감방안 도출이 매우 필요하다.

고층 건물에서의 연돌효과에 대한 연구는 국내외에서 지속적으로 이루어져 왔다. 고층의 사무실 건물에서 연돌효과에 의한 압력변화를 측정하고 열드래프트 계수(Thermal Draft Coefficient)를 이용해서 압력형성의 특성을 분석하였고,⁽²⁾ 주거용 고층 건물 2개 동에서 연돌효과의 실측 실험을 수행하여 이를 분석하였고 기밀문(Air-lock Door)를 사용하여 연돌효과를 저감하는 방안을 제시하였다.⁽³⁾ 고층 건물에서 연돌효과에 영향을 미치는 건축적 요소들을 선별해서 네트워크 모델을 이용해 이들 요소들의 영향을 정량적으로 분석하였다.⁽⁴⁾

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

Table 1 Construction state of high-rise building in Korea.
(unit : No. of building)⁽¹⁾

Floor	Year	2006	2007	2008	2009	2010
20-30 floor		428	1,235	816	689	876
Over 31 floor		51	115	173	80	170

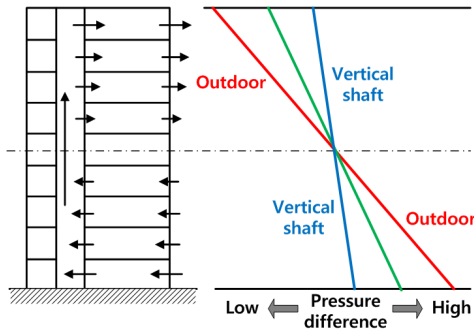


Fig. 1 Schematic diagram of stack effect in high-rise building.

본 연구에서는 연돌효과가 발생하는 상황에서의 고층 건물 대상 현장실험을 통해 고층 건물의 계단에서 연돌효과를 저감시킬 수 있는 유용한 방안을 도출하였고, 3차원 수치해석 기법을 이용하여 제시된 방안의 실효성을 파악하였으며 설계변수에 따른 정량적인 연돌효과 저감 효과를 분석하였다.

2. 현장실험 수행을 통한 연돌효과 저감방안 도출

2.1 현장실험 대상 및 실험조건

본 연구에서는 연돌효과가 크게 발생하는 동절기에 Fig. 2와 같이 31층의 고층 건물을 대상으로 계단(Stair)의 저층에서 고층까지 일정간격으로 압력센서를 설치하였으며, 저층인 3층과 고층인 30층은 계단과 연결된 부속실(Lobby), 거실(Room)에서도 압력을 동시에 계측할 수 있도록 하였다. Fig. 3은 각 구획실에서 형성되는 압력을 측정하기 위해 계단과 거실에 설치한 압력센서를 보여주고 있다.

실험조건은 Table 2와 같이 전층의 계단과 부속실의 문을 닫은 상태(CASE 1), 1층의 계단과 부속실의 문을 개방한 상태(CASE 2) 및 1층과 31층의 계단과 부속실의 문을 개방한 상태(CASE 3)에서 각 측정위치의 압력변화를 계측하였다. CASE 2와 CASE 3과 같이 계단과 부속실의 문을 개방하면 계단실과 계단실 외부사이에 공기가 흐르는 유로가 형성되고 각 층의 실간 압력조건에 따라 계단실 쪽으로 공기가 흐르거나 계단실에서 계단실 외부로 공기가 배출된다. 실험을 수행할 때, 외부온도는 약 7℃, 실내온도는 약 23℃를 유지하였다.

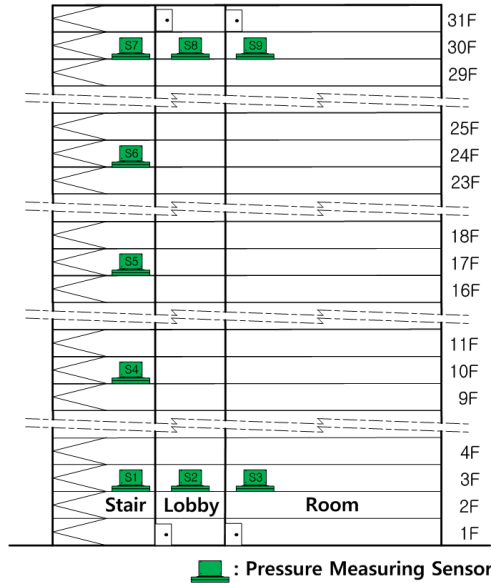


Fig. 2 Location of pressure measuring sensor.



(a) At stair



(b) At room

Fig. 3 Photograph of pressure measuring sensor.

Table 2 Conditions of experiment

Case	Conditions
CASE 1	All doors are closed
CASE 2	Doors on the 1st floor are opened. Others are closed.
CASE 3	Doors on the 1st and 31th floor are opened. Others are closed.

2.2 실험결과 및 연돌효과 저감방안 도출

상기의 실험결과는 관련 논문에서 상세하게 제시되어 있으며,⁽⁵⁾ 실험의 핵심결과는 다음과 같다. Fig. 4는 CASE 1, CASE 2 및 CASE 3로 실험조건이 변하면서 3층과 30층의 계단과 부속실, 부속실과 거실 간 압력차의 변동치를 그래프로 나타내었으며, Fig. 5는 계단과 부속실 간 압력차의 변동치를 간략화하여 추세를 알아보기 쉽게 정리하였다. 실험에서 모든층의 계단과

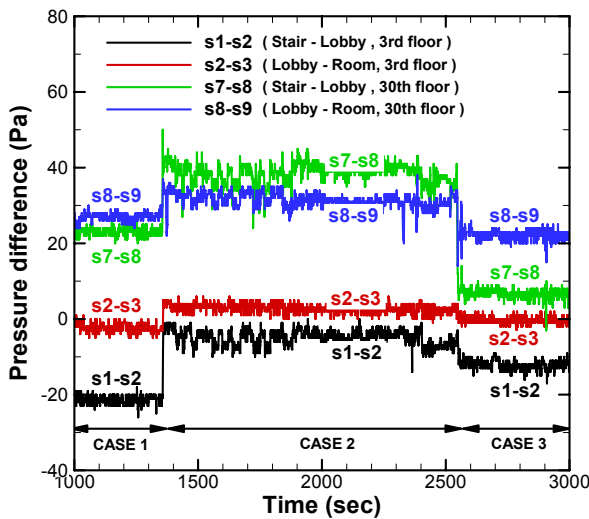


Fig. 4 Variations of pressure difference between compartments.

Contents	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Pressure difference between lobby and stair	21 Pa	4 Pa	12 Pa
Tendency of pressure difference			

(a) 3rd floor

Contents	CASE 1	CASE 2	CASE 3
Pressure difference between lobby and stair	23 Pa	38 Pa	7 Pa
Tendency of pressure difference			

(b) 30th floor

Fig. 5 Tendency of variation in pressure difference.

부속실의 문이 닫혀져 있을 때 연돌효과의 영향으로 3층에서는 부속실에서 계단방향으로 문에 약 21 Pa의 압력이 작용하고 30층에서는 계단에서 부속실방향으로 약 23 Pa, 부속실에서 거실방향으로 약 27 Pa의 압력이 작용한다.

그리고 1층의 계단과 부속실의 문만 개방되면 고층부에는 연돌효과가 커져서 30층의 계단에서는 부속실방향으로 작용하는 압력이 약 23 Pa에서 약 38 Pa로 상승하고 있다. 한편 1층의 문 개방에 더하여 31층의 계단과 부속실의 문이 함께 개방되면 연돌효과가 줄어들면서 30층의 계단에서는 부속실 방향으로 작용하는 압력이 약 7 Pa로 크게 하강하고 있다.

상기 실험결과에서 주목할 점은 계단과 부속실의 문이 모두 닫혀있는 경우에 비해서 1층과 31층의 문이 개방되어 있을 때 계단에서의 연돌효과가 크게 감소하고 있다는 점이다. 즉, 문이 모두 닫혀있는 경우에 비해서 1층과 31층의 문이 개방되면 고층부인 30층에서 “계단압력과 부속실압력의 차(s7-s8)”가 약 23 Pa에서 약 7 Pa로 감소하였고 저층부인 3층에서도 “계단압력과 부속실압력의 차(s1-s2)”가 약 -21 Pa에서 약 -12 Pa로 차이가 줄어든 것이다. 이러한 분석결과로부터 Fig. 6과 같이 계단의 저층부에서 계단으로 공기가 급기되고 고층부에서 계단의 외부로 공기가 배기되도록 공기의 흐름을 생성시켜 준다면 고층 건물의 계단에서의 연돌효과가 저감될 것으로 예측할 수 있다.

본 연구에서는 계단의 저층부에서 고층부로 공기의 흐름을 생성시키면 연돌효과가 감소된다는 현장실험의 결과를 공학적으로 적용하기 위하여 Fig. 7과 같은 방안을 고안하였다. 구체적 내용은 그림에서와 같이 수직풍도와 송풍기를 이용하여 계단의 저층부에서 급기그릴을 통해 공기를 급기하고 고층부에서 배기그릴을 통해 배기하는 순환형 연돌효과 저감방안이다.

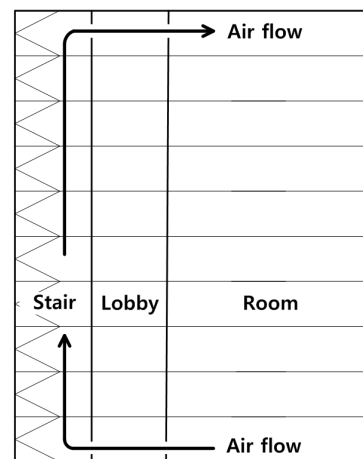


Fig. 6 Air flow in stairwell for reduction of stack effect.

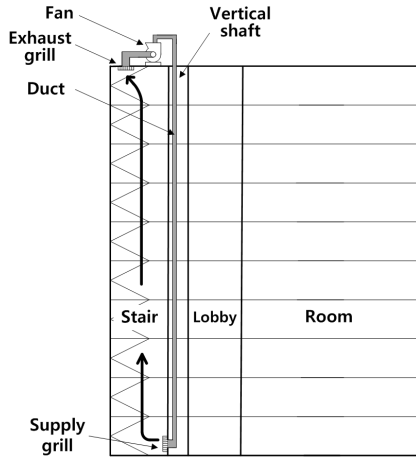


Fig. 7 Schematic diagram of reduction method of stack effect in stairwell.

3. 3차원 수치해석을 통한 연돌효과 저감방안의 성능평가

3.1 수치해석 수행조건

앞에서 제시한 순환형 연돌효과 저감방안이 실제로 고층 건물에서 효과적으로 작동하는지에 대한 검토가 필요하며 구체적으로는 실내의 온도차, 건물 높이, 송풍기 풍량 등의 설계인자를 고려하여 정량적으로 어느 정도 연돌효과의 저감이 이루어지는지에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 3차원 수치해석적 방법을 이용하여 제시한 순환형 연돌효과 저감방안의 분석을 수행하였다.

Fig. 8은 순환형 연돌효과 저감방안의 성능분석을 위해 구성한 건축물 계단의 해석모델을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 계단의 층수는 총 11층이고 각 층의 높이는 3 m이다. 1층과 11층에 계단과 연결되는 부속실 및 출입문을 설치하였으며, 외부와 접하는 부속실의 한 면 전체를 개구부로 처리하였다. 순환형 연돌효과 저감방안의 작동을 포함하기 위하여 1층과 11층에 덕트를 연결하였으며, 덕트의 끝면에 공기 유입구(Inlet)와 공기 유출구(Outlet)를 경계조건으로 지정하였다.

한편 건축물에서 연돌효과를 포함하는 유동장에 대한 3차원 수치해석을 수행하기 위해서는 건축물내 구획실간 틈새에 대한 해석기법이 제시되어야 한다. 본 연구의 해석모델에서 계단과 부속실 사이에 출입문의 틈새가 있는 것과 같이 건축물에는 각 구획실간 틈새가 존재하며, 이러한 틈새를 통해서 유동이 발생하게 된다. 이러한 틈새 누설 유동은 건축물에서 일어나는 다양한 열유동 현상에 영향을 미치게 되며, 연돌효과에 대해서도 중요한 인자로 고려되고 있다. 그런데 3차원 수치해석에서 틈새의 누설 유동을 해석할 경우에

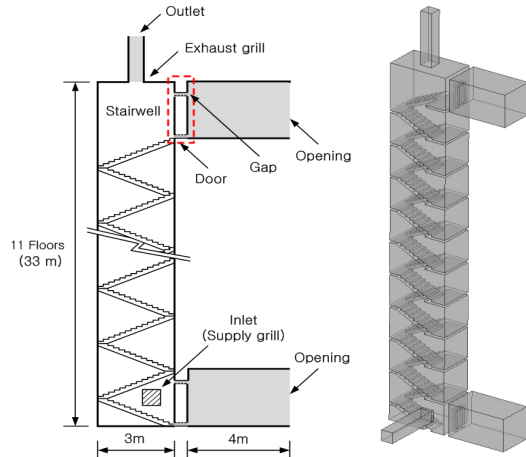


Fig. 8 Numerical model of stairwell for analysis of stack effect reduction.

는 건축물의 타 공간에 비해 틈새의 단면적이 매우 적기 때문에 틈새를 포함하는 격자생성과 3차원 유동해석에 많은 어려움이 발생하고 있다. 따라서 틈새를 포함하는 3차원 해석을 위한 방안이 필요하며, 본 연구에서는 운동량방정식의 생성항에 “출입문의 누설유량과 출입문 전후의 압력차의 관계식”을 반영하는 Momentum Loss Model⁽⁶⁾을 사용하였다.

즉 해석모델의 격자에서 출입문 틈새부분의 영역에 대해서 식(1)과 같이 압력저하가 통과유속에 비례하도록 하는 Momentum Loss Model을 적용하면 틈새유동의 효과를 반영할 수 있다.

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = K_{loss} \frac{\rho}{2} |u| u_i \quad (1)$$

여기서 K_{loss} 는 2차 저항계수이다.

앞서의 관련 연구에서는 이러한 Momentum Loss Model을 적용하여 계단에서의 연돌효과를 3차원 수치해석적 방법으로 해석하였다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 연돌효과 저감방안이 적용되지 않는 경우로서 공기 유입구와 공기 유출구의 유출입 풍량을 0으로 하였을 경우와 연돌효과 저감방안이 작동하는 경우로서 공기 유입구와 공기 유출구의 유출입 풍량을 Table 3과 같이 각각 1.0-5.0 m³/s로 변화해가며 3차원 수치해석을 수행하였다.

한편 공기의 유출입 풍량과 함께 건축물에서 연돌효과와의 작용에 영향을 미치는 인자가 실내외 온도이다. 본 연구에서는 실내온도(Ti)를 20℃로 고정하고, 실외온도(To)를 -20 - 10℃로 변화시켜가며 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 수치해석 프로그램으로서 정확성과 타당성이 검증되어 열유동 해석문제에 널리 적용되고 있는 CFX14⁽⁶⁾를 사용하였다.

Table 3 Conditions of numerical analysis

Factor	Range
Outdoor temperature	-20 - 10℃
Indoor temperature	20℃
Flow rate	1.0 - 5.0 m ³ /s

3.2 수치해석 결과 및 검토

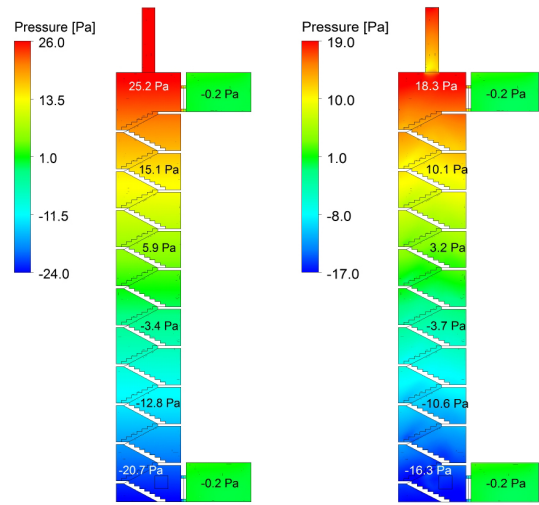
Fig. 9와 Fig. 10은 3차원 수치해석의 해석결과로서 해석모델의 중앙단면에서의 압력분포를 보여주고 있다. Fig. 9는 실외온도가 -20℃일 경우에 대한 해석결과이고, Fig. 10은 실내온도가 0℃일 경우에 대한 해석결과를 보여주고 있다.

Fig. 9(a)는 실외온도가 -20℃이고 공기의 유출입 풍량이 0 CMS로서 연돌효과 저감방안이 적용되지 않아서 순수하게 실내외 온도차에 따른 연돌효과에 의해 생성되는 압력분포를 보여준다. 그림에서와 같이 1층 계단에서는 약 -20.7 Pa 정도의 부압이 형성되고 11층 계단에서는 약 25.2 Pa 정도의 양압이 형성된다. 한편 Fig. 9(b)는 공기의 유출입 풍량이 3 CMS일 경우에 대한 해석결과로서 1층 계단에서는 약 -16.3 Pa 정도의 부압이 형성되고 11층 계단에서는 약 18.3 Pa 정도의 양압이 형성된다. 즉 실외온도가 -20℃인 상태에서 순환형 연돌효과 저감방안을 적용하고 송풍량을 3 CMS로 운전할 경우에 1층 계단에서는 연돌효과로 인해 생기는 부압이 -20.7 Pa에서 -16.3 Pa로 약 4.4 Pa 정도 개선되고 11층 계단에서는 25.2 Pa에서 18.3 Pa로 약 6.9 Pa 정도 줄어든다.

Fig. 10(a)는 공기의 유출입 풍량이 0 CMS로서 실외온도가 0℃일 경우 순수한 연돌효과로 생성되는 압력분포를 보여준다. 그림에서와 같이 1층 계단에서는 약 -10.5 Pa 정도의 부압이 형성되고 11층 계단에서는 약 12.6 Pa 정도의 양압이 형성된다. 한편 Fig. 10(b)는 공기의 유출입 풍량이 3 CMS일 경우에 대한 해석결과로서 1층 계단에서는 약 -6.0 Pa 정도의 부압이 형성되고 11층 계단에서는 약 5.4 Pa 정도의 양압이 형성된다. 즉 실외온도가 0℃인 상태에서 3 CMS의 송풍량으로 순환형 연돌효과 저감방안을 가동하면 1층 계단에서는 연돌효과로 인해 생기는 부압이 -10.5 Pa에서 -6.0 Pa로 약 4.5 Pa 정도 개선되고 11층 계단에서는 12.6 Pa에서 5.4 Pa로 약 7.2 Pa 정도 줄어든다.

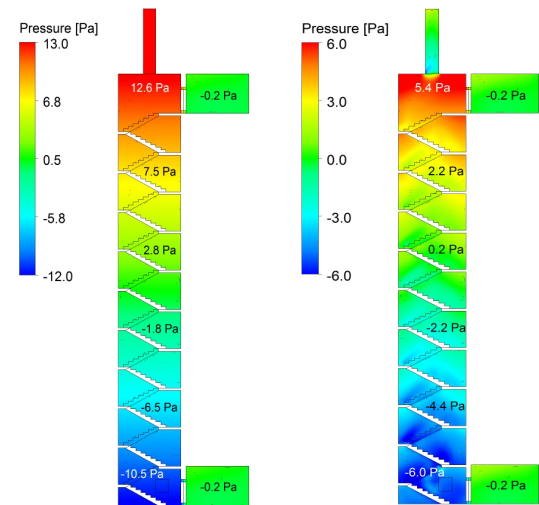
Fig. 11과 Fig. 12는 전체적인 수치해석의 결과로서 실외온도와 연돌효과 저감방안의 송풍량 변화에 따른 1층 계단과 11층 계단에서의 압력값을 보여주고 있다.

Fig. 11은 11층 계단에서의 압력값을 나타내고 있으며, 그림에서 송풍량이 0 CMS인 조건은 순수하게 연돌효과만 작용하는 상태이며 이 경우 11층 계단에서는



(a) -20℃, 0 CMS (b) -20℃, 3 CMS

Fig. 9 Pressure contours on center plane of stairwell for outdoor temperature of -20℃.



(a) 0℃, 0 CMS (b) 0℃, 3 CMS

Fig. 10 Pressure contours on center plane of stairwell for outdoor temperature of 0℃.

모두 양압이 형성되고 실외온도가 낮을수록 계단의 압력이 높아지는 것을 알 수 있다. 연돌효과 저감방안이 운전되어 계단의 하부에서 상부로 공기유동이 형성되면 11층 계단에서 연돌효과로 발생하는 양압이 감소하며 이 때 송풍량 증가에 대하여 2차원적 관계를 가지며 압력이 줄어들고 있다. 실외온도가 10℃인 경우 연돌효과로 인해 11층 계단에서 약 6.1 Pa의 양압이 형성되나 3 CMS의 송풍량으로 연돌효과 저감방안이 운전되면 11층 계단에서의 압력이 약 -0.6 Pa로 감소하게 되고 연돌효과의 영향이 완전히 상쇄되어 없어지게 된다.

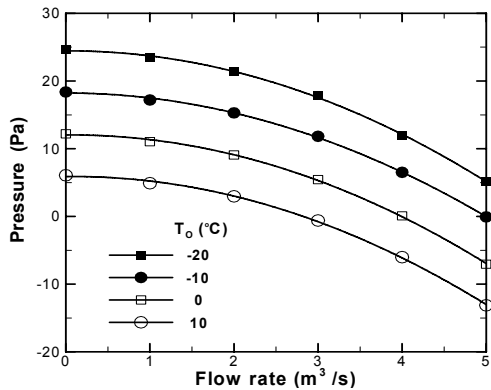


Fig. 11 Pressure at 11th stair for outdoor temperature and flow rate.

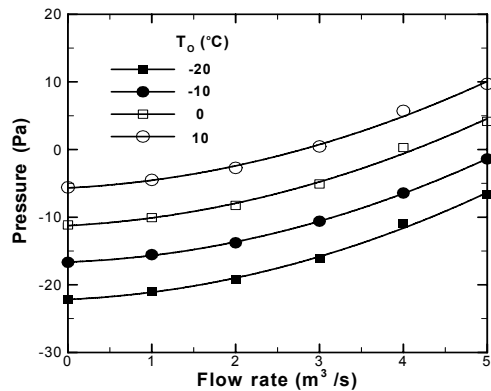


Fig. 12 Pressure at 1st stair for outdoor temperature and flow rate.

Fig. 12는 실외온도와 송풍량에 따른 1층 계단에서의 압력값을 보여준다. 1층 계단에서는 연돌효과에 의해 부압이 형성되고 있으며, 실외온도가 낮을수록 계단의 압력이 떨어진다. 1층 계단에서도 연돌효과 저감방안이 운전되면 연돌효과가 상쇄되면서 압력이 송풍량 증가에 대하여 2차원적 관계를 가지며 올라가는 것을 알 수 있다. 11층에서와 유사하게 실외온도가 10°C인 경우 3 CMS의 송풍량으로 연돌효과 저감방안이 운전되면 1층 계단에서의 압력이 약 0.7 Pa로 증가하고 연돌효과의 영향이 없어지게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 공기의 급기와 배기를 이용하여 건축물 계단에서의 연돌효과를 저감시키는 순환형 연돌효과 저감방안에 대하여 3차원 수치해석을 수행하고 정량적인 연돌효과 저감 효과를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 계단의 저층부에서 급기그릴을 통해 공기를 급기하고 고층부에서 배기그릴을 통해 배기하는 순환

형 연돌효과 저감방안을 적용하면 건축물의 계단에서의 연돌효과가 축소된다.

- (2) 11층 규모의 계단에서 실외온도가 -20°C인 경우에 연돌효과에 의해서 1층 계단에서는 약 -20.7 Pa의 부압이 형성되고, 11층 계단에서는 약 25.2 Pa의 양압이 형성된다.
- (3) 11층 규모의 계단에서 실외온도가 -20°C인 경우에 순환형 연돌효과 저감방안을 적용하고 송풍량을 3 CMS로 운전한다면 1층 계단에서는 연돌효과가 약 4.4 Pa 정도 줄어들고 11층 계단에서는 약 6.9 Pa 정도 줄어든다.
- (4) 순환형 연돌효과 저감방안이 적용될 경우, 연돌효과에 의해 발생하는 고층에서의 양압과 저층에서의 부압은 송풍량 증가에 따라 2차원적 관계를 가지며 압력의 절대값이 줄어든다.

후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화 지원사업의 일환으로 국토교통과학기술진흥원이 관리하고 있는 “수직통로 내 공기의 급기 및 배기를 통한 고층건물에서의 연돌효과 저감설비 개발” 과제의 지원으로 이루어진 것으로서 이에 감사를 드립니다.

References

1. The Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014, Statistical information on land, infrastructure and transport, <<http://stat.molit.go.kr>>.
2. Tamura, G. T. and Wilson, A. G., 1967, Pressure differences caused by chimney effect in three high buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 73, Part 2, pp. II.1.1-II.1.10.
3. Jo, J. H., Lim, J. H., Song, S. Y., Yeo, M. S., and Kim, K. W., 2007, Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings, Building and Environment, Vol. 42, No. 1, pp. 263-277.
4. Yang, H., Yeo, M. S., Jo, J. H., and Kim, K. W., 2002, Simulation of the stack effect in high-rise buildings, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 456-467.
5. Kim, J. Y. and Shin, H. J., 2011, A study on reduction method of stack effect at stairwell of high-rise building, Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 14-20.
6. ANSYS, Inc., 2014, ANSYS CFX-Solver Theory Guide.
7. Kim, J. Y., Kim J. S., 2013, Study on numerical model of leakage flow at gap between compartments in a building, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 10, pp. 562-567.