Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 27, No. 9 (2015), pp.484-490
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2015.27.9.484

건축물 계단에서의 연돌효과 저감방안에 대한 현장실험 연구

Study on Field Experiment of Stack Effect Reduction in Stairwell of Building

김정엽(Jung-Yup Kim)†, **김지석**(Ji-Seok Kim), **이수각**(Su-Gak Lee)
한국건설기술연구원 화재안전연구소
Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Koyang, 10223, Korea

(Received April 7, 2015; revision received August 6, 2015; Accepted: August 10, 2015)

Abstract The winter stack effect that occurs in vertical construction passages such as the stairwell or elevator shaft of a high-rise building negatively affects living environments, energy usage, and personal safety; therefore, a mitigation of the stack effect is required to improve building conditions. Recently, circulation-type facilities that comprise the usage of air blowers and vertical ducts were proposed as part of a mechanical approach to quantitatively control the stack effect. In this study, these circulation-type facilities were installed in a building stairwell and the performance of the device was evaluated during its operation. A numerical-analysis result was obtained under the test conditions using a network-model-based, numerical-analysis method, and the result was then used for a comparison with the test result.

Key words Stack effect(연돌효과), High-rise building(고층건물), Pressure difference(압력차), Field experiment(현장실험), Numerical analysis(수치해석)

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

1. 서 론

고층 건축물에서는 동절기에 계단이나 승강로와 같은 수직통로를 통해서 연돌효과가 발생하면서 거주환경과 에너지 및 방재 측면에서 악영향이 발생하고 있다. 연돌효과가 심하게 영향을 미치는 건축물에서는 상층부 피난계단의 피난문이 열리지 않아서 긴급한 상황에서 대피가 곤란할 수 있으며, 승강기가 오작동을 일으키기도 한다. 한편 연돌효과로 인해 동절기에 온도가 낮은 외부공기가 저층부에서 실내로 침입하고 공조가 된 실내공기가 상층부에서 외부로 유출됨으로서 난방 에너지의 5~10% 정도가 손실되는 것으로 평가되고 있다. 따라서 고층 건축물에서 에너지와 환경 성능의 개선을 위해서는 연돌효과에 대한 저감방안의 도출이 매우 필요하다.

고층 건축물에서의 연돌효과에 대한 연구는 국내외에서 지속적으로 이루어져 왔다. 실제 건축물에서 연돌효과를 측정하고 보완조치를 검토하였으며,[1-4] 네트워크 모델을 기반으로 하는 수치기법을 사용하여 연돌효과에 대한 수치해석을 수행하였다.[5, 6]

현재 고층 건축물에서 연돌효과를 제어하기 위해 많이 적용되는 있는 방법은 외벽의 기밀도를 높이고 방풍실을 설치해서 공기의 침투를 최소화하거나 이중문을 설치해서 실내 압력차를 분산하는 건축적인 방식이다. 이러한 방식과 함께 연돌효과에 대한 능동적이고 정량적인 제어를 위한 설비적 방안을 검토할 필요가 있다.

이전 연구에서는 수직계단에 대해서 계단의 저층부에서 공기를 급기하고 고층부에서 계단의 외부로 공기를 배기함으로써 연돌효과를 저감하는 방안이 제시되었다.[7] 즉, Fig. 1과 같이 송풍기와 수직풍도를 이용하여 공기의 급기와 배기를 수행하는 순환형 연돌효과 저감 시스템이 제안되었으며, 3차원 수치해석 기법을 사용하여 제안된 시스템의 연돌효과 저감 성능을 검토하였다.

본 연구에서는 위에서 언급한 순환형 연돌효과 저감장치를 실제 건축물에 설치하고 동절기에 가동하면서 연돌효과 저감장치의 실효성을 분석하였으며, 네트워크 모델 기반의 수치해석 기법을 이용하여 실험조건에 대한 수치해석 결과를 얻고 실험결과와 비교하였다.

2. 현장실험

2.1 현장실험 방법

본 연구에서는 연돌효과가 크게 발생하는 동절기에 서울에 위치하는 중규모의 D빌딩을 대상으로 계단에서의 연돌효과 저감방안에 대한 현장실험을 수행하였다. D빌딩은 지상 10층, 지하 3층 규모로서 용도는 업

ⓒ SAREK

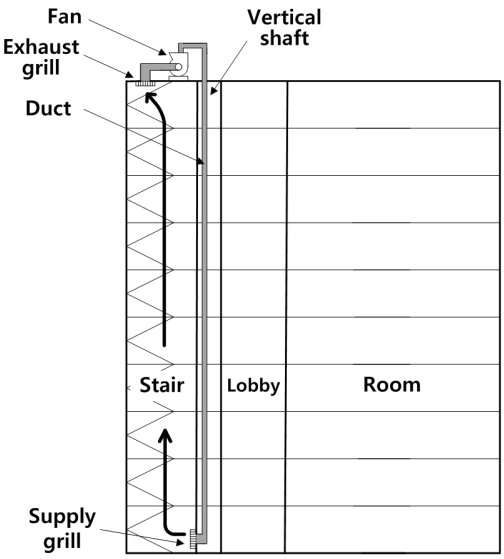


Fig. 1 Schematic diagram of reduction method of stack effect in stairwell.

(a) Complete view (b) Lobby at 1st floor

(c) Stairwell (d) Corridor

Fig. 2 Photograph of building structure.

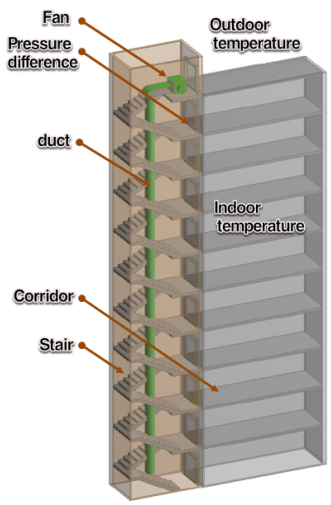


Fig. 3 Schematic diagram of field experiment condition.

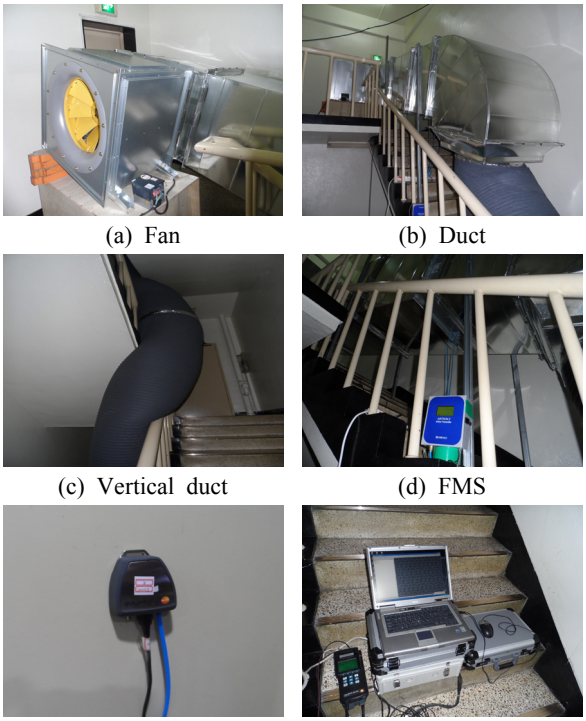
무와 판매시설이고 수직통로로는 피난계단 2기와 승강기 2기를 보유하고 있다. Fig. 2는 실험이 수행된 D빌딩의 전경과 내부구조를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 1층 로비에 승강기 2기가 좌우로 위치하고 있고 승강기 측면에 피난계단이 설치되어 있다. 피난계단은 외측과 맞대여 있으며 환기창이 설치되어 있다. 업무와 판매시설이 있는 각층은 승강기와 피난계단이 복도에 연결되어 있고 복도를 따라 사무실이 연결되어 있다.

Fig. 3은 연돌효과 저감방안의 현장실험 개요를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 상기 D빌딩의 피난계단 1기에 대해서 연돌효과 저감 실험장치와 각종 측정기기를 설치하였다. 실험대상 피난계단은 10층에서 1계층을 올라가서 옥상으로 통하게 되어 있으며 실험에서는 옥상으로 통하는 피난문의 바로 앞에 있는 공간에 송풍기를 설치하였다. 송풍기의 출구에 일정 길이의 철재 덕트를 연결하였으며, 철재 덕트 끝단에 플렉시블 풍도로 연결한 후 플렉시블 풍도를 1층까지 수직으로 연장하여 설치하였다. 이와 같은 송풍경로를 설치함으로써 피난계단의 상부층에서 송풍기로 계단내 공기를 배기하고 하부층에서 급기하는 시스템이 구성되도록 하였다.

실험 수행시의 실내외 온도와 송풍 조건 및 송풍기의 가동으로 변하는 압력차를 측정하기 위해서 10층 복도에서의 실내온도(T_i), 옥상에서의 실외온도(T_o), 10층 계단실과 복도의 압력차(ΔP_{10F}) 및 송풍기의 송풍량(Q_f)을 각각 계측하였다.

Fig. 4는 연돌효과 저감방안의 현장실험 진행과정을 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 피난계단 최상부에 설치된 송풍기를 보여주고 있고, Fig. 4(b)는 송풍기 출구에 연결된 철재 덕트의 모습이다. Fig. 4(c)는 피난계단 상부에서 1층까지 수직으로 설치된 플렉시블 풍도의 모습이다. 한편 Fig. 4(d)는 송풍기의 송풍량을 측정하기 위한 FMS(Flowrate Measuring Sensor)이고, Fig. 4(e)는 10층 계단실과 복도의 압력차를 측정하기 위한 압력센서를 보여주고 있다. Fig. 4(f)는 측정된 각종 데이터를 수집해서 저장하는 로깅장치를 보여주고 있다.

연돌효과 저감방안에 대한 현장실험은 우선 송풍기를 가동하지 않은 상태에서 자연적으로 연돌효과가 발생하는 조건으로 측정을 한 후 송풍기를 가동하여 송풍량이 50 CMM과 100 CMM 정도로 형성되었을 때의 조건에서 실험을 수행하였다.



(a) Fan (b) Duct

(c) Vertical duct (d) FMS

(e) Pressure sensor (f) Logging system

Fig. 4 Photograph of experiment facilities.

2.2 현장실험 결과

Fig. 5는 시험이 수행되는 시간동안 계측된 실내온도와 실외온도의 측정값을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 실내온도는 비교적 일정한 값을 유지하고 있고 실외온도는 약 0.5℃에서 4.0℃사이에서 변동하고 있다. 시간에 따라 평균을 구하면 실내온도는 약 13.2℃, 실외온도는 약 2.0℃ 및 실내외 온도차는 약 11.2℃로 평균값을 구하였다.

Fig. 6은 실험시간에 따른 송풍기의 송풍량과 10층에서의 계단실-복도간 압력차의 측정값을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 실험초기에는 송풍기를 가동하지 않고 자연적인 연돌효과에 의해 생기는 압력차를 계측하였고, 840초 정도에 송풍기를 가동하여 송풍량을 약 50 CMM로 유지하면서 측정을 하였고 1,340초 정도에 송풍량을 약 100 CMM으로 상승시켜서 측정을 하였다. 10층의 계단실과 복도간 압력차는 시간에 따라 2~3 Pa 정도의 변동폭을 나타내며 계측되고 있는데, 중요한 점은 송풍기가 가동되고 송풍량이 증가됨에 따라 10층의 계단실과 복도간 압력차가 감소하는 방향으로 형성된다는 점이다.

Fig. 7은 Fig. 6의 실험결과에 대해 시간 평균치를 구해서 도시한 것이다. 즉 Fig. 6의 실험결과에서 송풍량이 일정한 구간을 선정하고 각 구간에서 10층의 계단실과

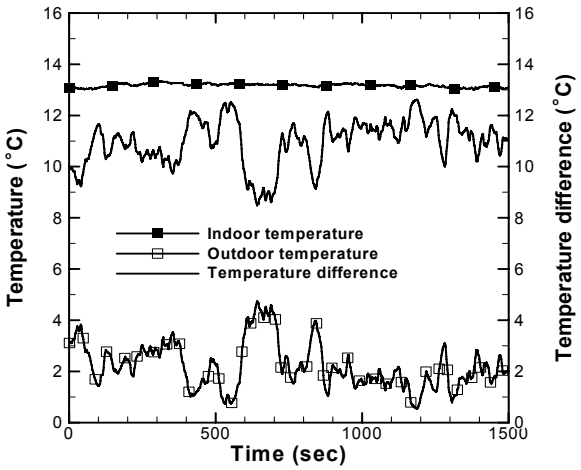


Fig. 5 Variations of indoor and outdoor temperature.

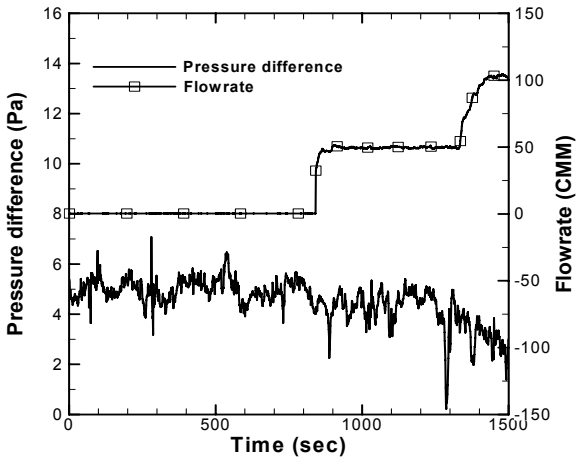


Fig. 6 Variations of pressure difference and flowrate.

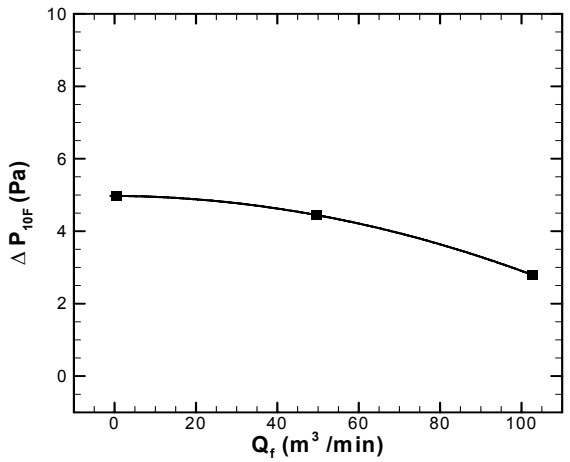


Fig. 7 Pressure difference between stair and lobby at 10th floor for flow rate.

ⓒ SAREK

복도간 압력차에 대한 평균값을 구한 결과이다. 그림에서와 같이 현장실험 대상 건물과 실험의 실내외 온도조건 하에서 연돌효과에 의해 발생하는 10층의 계단실-복도간 압력차는 약 5.0 Pa이 된다. 한편 연돌효과 저감장치를 가동해서 송풍량이 50 CMM이 되면 10층의 계단실-복도간 압력차는 약 4.4 Pa이 되고 송풍량이 100 CMM이 되면 압력차가 약 2.8 Pa로 감소한다. 연돌효과 저감설비의 송풍량에 따라 10층의 계단실과 복도간 압력차가 2차원적 경향으로 줄어듬을 알 수 있다. Fig. 6의 실험결과로부터 본 연구에서 제시하는 연돌효과 저감방안이 실제로 동절기에 고층 건축물에서 발생하는 연돌효과를 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 방법

본 연구에서는 네트워크 모델을 기반으로 하는 수치해석적 방법을 이용해서 연돌효과 저감방안의 현장실험 조건에 대한 해석을 수행하고 실험결과와 비교하였다. 해석은 미국 NIST에서 제작한 CONTAMW 3.1[8] 프로그램을 사용하였다. 대상 건물의 모델링은 지하 3층부터 지상 10층까지 설계도면을 바탕으로 구성하였다. Fig. 8은 CONTAMW로 작성한 전처리 구성도로서 Fig. 8(a)는 1층의 구성도이고 Fig. 8(b)는 10층의 구성도를 각각 보여주고 있다.

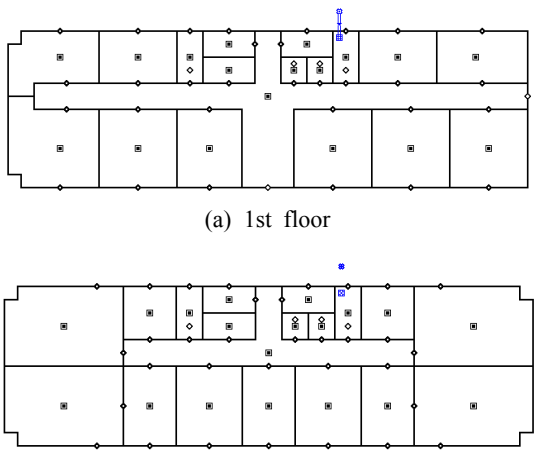
그림에서와 같이 각층의 구획실은 “Zone”으로 구성하였고, 각 구획실 간의 출입문은 “Airflow Element”로 처리하였다. 그리고 피난계단과 승강기는 각각 “Stair-well”과 “Shaft”로 설정하여 수직통로의 역할을 지정하였다. 한편 우측 피난계단에 설치한 연돌효과 저감장치는 “Duct Junction”과 “Fan” 기능을 이용하여 처리하였다.

해석을 위한 온도조건은 현장실험에서 구한 온도조건을 그대로 반영하였으며, 이에 따라 실내온도는 13.2℃, 실외온도는 2.0℃로 설정하였다. 그리고 송풍기가 가동하지 않을 때의 조건과 송풍기의 송풍량이 50 CMM, 100 CMM일 조건에 대해서 수치해석을 수행하였다.

3.2 수치해석 결과

Fig. 9는 송풍기의 송풍량이 100 CMM인 조건에서 각층에서의 수치해석 수행결과를 보여주고 있다. Fig. 9 (a)는 1층에서의 결과로서 외부에서 실내로 외부공기가 유입되고 계단과 승강기를 통해 윗층으로 상승하고 있다. 한편 연돌효과 저감장치의 수직풍도를 통해 100 CMM의 송풍량이 1층의 우측 계단실로 유입되고 있다. Fig. 9 (b)는 10층에서의 결과로서 각 수직통로를 통해 상승한 공기가 구획실간 틈새를 통해서 실외쪽으로 유출되고 있다. 한편 연돌효과 저감장치가 가동되고 있는 우측 계단실의 압력은 약 4.8 Pa로 형성되는데 반하여 장치가 설치되지 않는 좌측 계단실의 압력은 7.4 Pa으로 나타나며, 이로부터 연돌효과의 감소효과가 발생됨을 알 수 있다.

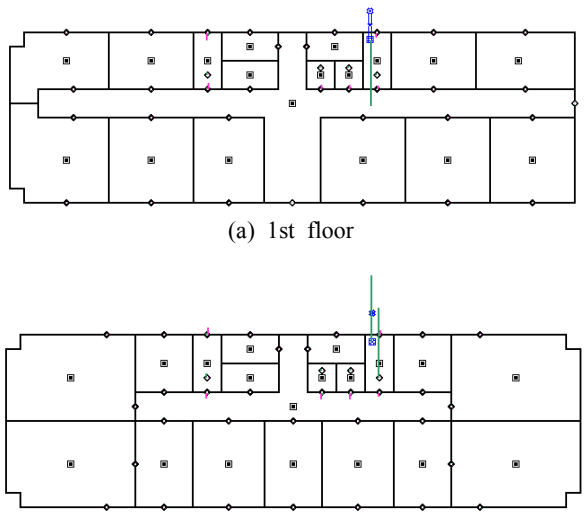
Fig. 10은 네트워크 모델을 사용한 수치해석 결과와 현장실험 결과를 비교하여 도시한 것으로서, 각 송풍기의 송풍량에 대하여 10층에서의 계단층과 복도간 압력차를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 수치해석 결과는 실험결과와 유사하게 송풍기의 송풍량이 증가함에 따라 2차 함수의 관계를 가지고 10층에서의 압력차가 감소하고 있다. 각 송풍량에 대해서 수치해석 결과



(a) 1st floor

(b) 10th floor

Fig. 8 Pre-process of numerical analysis.



(a) 1st floor

(b) 10th floor

Fig. 9 Results of numerical analysis.

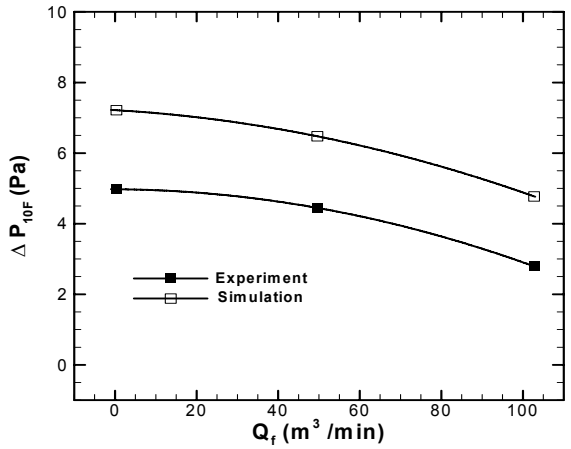


Fig. 10 Comparison of experiment and numerical analysis.

가 실험결과에 비해 2.0～2.2 Pa정도 절대값이 큰 것으로 나타났는데, 이는 현장실험과 수치해석의 조건들이 완벽하게 일치하지 않기 때문으로 판단된다. 실험과 수치해석 결과에 있어 일정값의 차이가 발생하고 있으나, 실험과 수치해석의 그래프 경향이 상당히 일치하고 있기 점을 고려하면 본 연구에서 제시하고 있는 연돌효과 저감방안이 성능에 있어서 타당성을 확보하는 것으로 판단되며, 향후 실제 건물에 대한 적용시 수치해석 기법을 사용한 설계가 진행될 수 있을 것이다.

한편 상기와 같은 네트워크 모델의 1차원 수치해석을 통해서 해석대상 건물의 주요 부분에서의 공기 유출입 풍량과 압력 변화를 검토할 수 있다. 즉, 연돌효과에 의해 발생하는 유동・압력장 및 연돌효과 저감장치의 가동에 따른 효과를 전체적으로 분석하는 것이다. 본 연구에서는 제 3.1절과 같이 CONTAMW를 이용하여 현장실험 조건에 대해 수행한 해석 결과를 검토하였으며, 이로부터 공기 유출입 풍량의 변화가 큰 것으로 판단되는 1층 계단과 로비사이 출입문 틈새의 공기 풍량을 분석하였고 또한 계단실 이외에 압력값이 크게 형성되는 3층과 9층 복도에서의 압력 변화를 분석하였다.

Fig. 11은 1층에서 연돌효과 저감방안이 적용되지 않은 계단의 출입문 틈새의 공기 풍량과 연돌효과 저감방안이 적용된 계단의 출입문 틈새의 공기풍량을 나타낸 것이다. 그림에서 X축은 연돌효과 저감방안의 송풍기 송풍량을 나타낸다. 그림에서와 같이 연돌효과 저감방안이 설치된 계단에서는 저감방안이 가동되고 송풍기 송풍량이 증가할수록 출입문을 통한 공기풍량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 한편 지하층을 포함한 대상 건물의 계단구조가 다르기 때문에 순수한 연돌효과 발생시(송풍기 송풍량이 “0”인 조건) 두 계단에서의 출입문 틈새 공기풍량이 약간 차이를 보이고 있다.

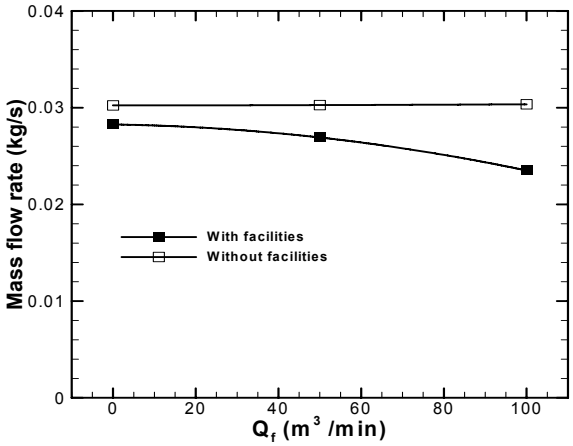


Fig. 11 Leakage mass flow rate at door of 1st floor.

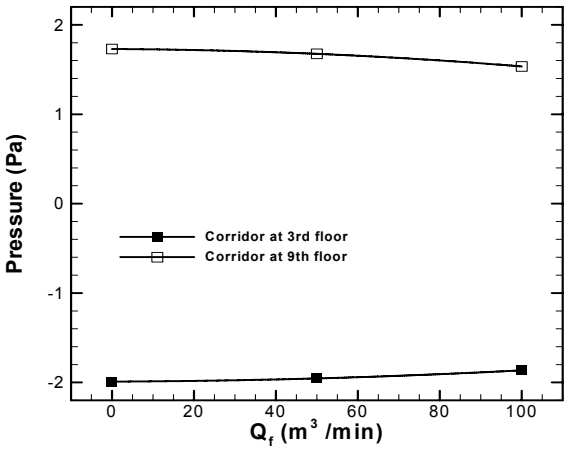


Fig. 12 Pressure at corridor of 3rd floor and 9th floor.

Fig. 12는 계단실 이외에 압력값이 비교적 크게 형성되는 3층과 9층 복도에서의 송풍기 송풍량에 따른 압력 변화를 보여주고 있다. Fig. 10과 비교해 보면 계단에서 형성되는 압력값에 비해 복도에서의 압력이 적은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 한편 연돌효과 저감방안의 송풍기 송풍량이 증가하면 각 복도에서의 압력값이 약간씩 감소하고 있음을 알 수 있다.

4. 외부 유출입 풍량 검토

본 연구에서는 검토대상인 순환형 연돌효과 저감장치의 가동에 따라서 발생하는 건축물내 외부공기의 유출입 풍량 변화를 정량적으로 분석하기 위해서 3차원 수치해석을 수행하였다.

Fig. 13은 순환형 연돌효과 저감방안의 동작효과 분석을 위해 구성한 건축물 계단의 해석 모델을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 한 건축물에서 두 개의 계단을

ⓒ SAREK

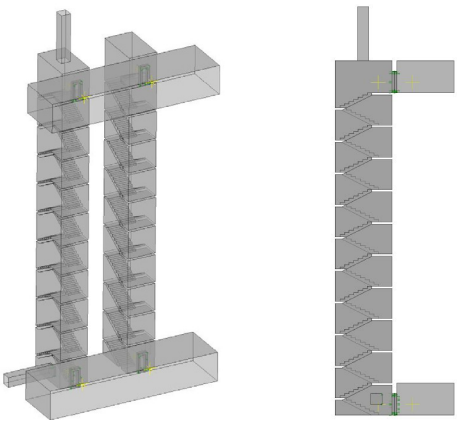
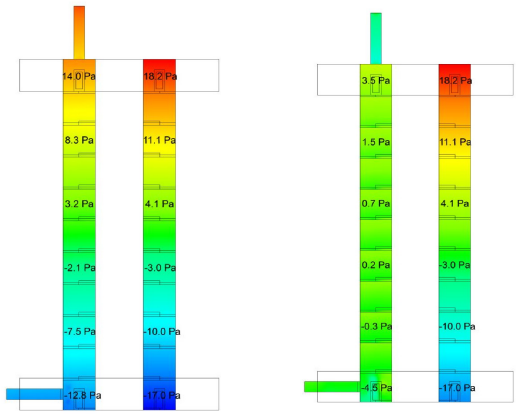


Fig. 13 Numerical model of 3D analysis.



(a) 2 CMS (b) 4 CMS

Fig. 14 Pressure contours on center plane.

포함하도록 하였으며, 한 개의 계단에는 순환형 연돌효과 저감장치를 설치하고 나머지 한 개의 계단은 설치하지 않았다. 각 계단의 층수는 총 11층이고 각 층의 높이는 3 m이다. 1층과 11층에 계단과 연결되는 로비와 출입문을 설치하였으며, 외부와 접하는 로비의 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. 순환형 연돌효과 저감장치의 해석방법에 포함되는 3차원 수치해석의 틈새해석 모델에 대해서는 이전 연구의 내용을 채택하였다.[7]

본 연구에서는 연돌효과 저감방안이 적용되지 않는 경우로서 송풍기의 송풍량을 0으로 하였을 경우와 연돌효과 저감방안이 작동하는 경우로서 송풍기의 송풍량을 각각 1.0~5.0 m^3/s로 변화해가며 3차원 수치해석을 수행하였다.

한편 송풍기의 송풍량과 함께 건축물에서 연돌효과의 작용에 영향을 미치는 인자가 실내외 온도이다. 본 연구에서는 실내온도(Ti)를 20℃, 실외온도(To)를 -10℃로 설정한 상태에서 수치해석을 수행하였다.

Fig. 14는 3차원 수치해석의 해석결과로서 해석 모델의 중앙단면에서의 압력분포를 보여주고 있다. Fig. 14 (a)는 송풍기의 송풍량이 2 CMS, Fig. 14(b)는 4 CMS에 대한 결과이다. 그림에서와 같이 송풍량이 0 CMS에서 4 CMS로 증가하면서 11층 계단에서의 압력은 약 18.2 Pa에서 약 3.5 Pa로 감소하며, 1층 계단에서의 압력은 -17.6 Pa에서 -4.5 Pa로 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편 연돌효과 저감장치가 설치되지 않은 계단에서는 압력값의 변화가 거의 일어나지 않고 있다.

Fig. 15와 Fig. 16은 송풍기의 송풍량에 따른 11층에서의 압력과 1층에서의 압력을 그래프로 나타낸 것이다. 위에서 분석한 내용과 같이 순환형 연돌효과 저감장치가 설치되지 않은 계단에 비해서 저감장치가 설치

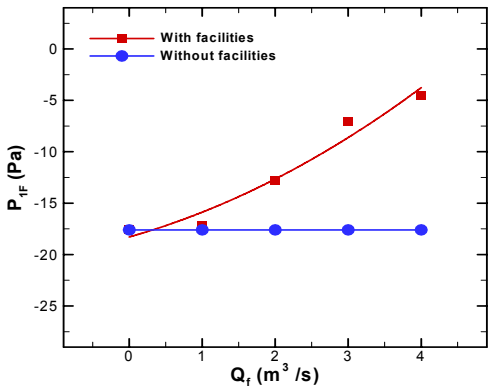


Fig. 15 Pressure at 1st stair for fan flow rate.

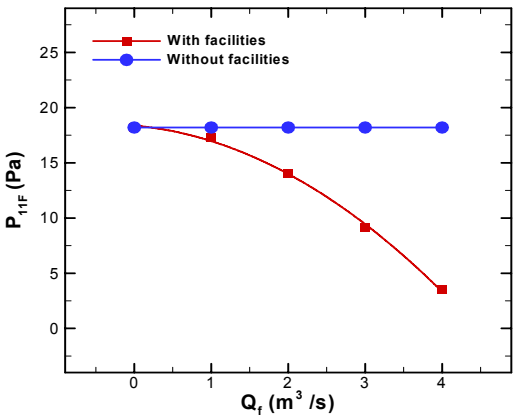


Fig. 16 Pressure at 11th stair for fan flow rate.

된 계단에서는 송풍기의 송풍량이 증가하면서 계단에 형성되는 압력값이 줄어드는 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 17은 송풍기의 송풍량에 따라 형성되는 1층 계단과 로비사이 출입문 틈새의 누설풍량을 나타낸다.

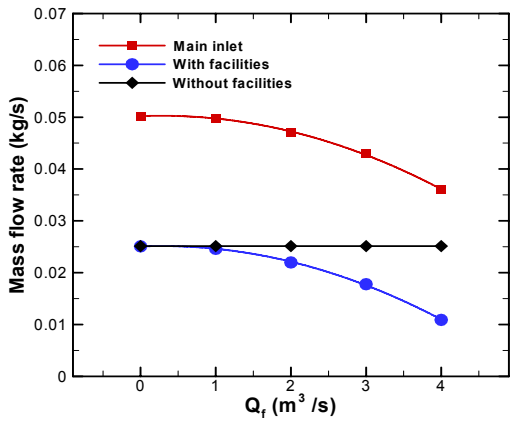


Fig. 17 Leakage mass flow rate for fan flow rate.

이 누설풍량은 외부의 유출입 풍량으로 생각할 수 있다. 그림에서와 같이 연돌효과 저감장치가 설치된 계단에서는 송풍기의 송풍량이 증가하면서 누설풍량이 점차 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉, 순환형 연돌효과 저감장치가 가동되면 연돌효과에 의해 발생하는 압력이 감소하고 이에 따라서 건축물과 외부사이의 유출입 풍량도 감소하는 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 공기의 급기와 배기를 이용하여 건축물 계단에서의 연돌효과를 저감시키는 순환형 연돌효과 저감방안에 대하여 현장실험을 통해 성능을 검토하고 네트워크 모델 기반의 수치해석 결과와 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 연돌효과 저감장치의 송풍기가 가동되고 송풍량이 증가됨에 따라 10층의 계단실과 복도간 압력차가 감소한다.

(2) 현장실험 대상 건물과 실험의 실내외 온도조건하에서 연돌효과에 의해 발생하는 10층의 계단실-복도간 압력차는 약 5.0 Pa이 된다.

(3) 연돌효과 저감장치를 가동해서 송풍량이 50 CMM이 되면 10층의 계단실-복도간 압력차는 약 4.4 Pa이 되고 송풍량이 100 CMM이 되면 압력차가 약 2.8 Pa로 감소한다.

(4) 연돌효과 저감설비의 송풍량에 따라 10층의 계단실과 복도간 압력차가 2차원적 경향으로 줄어든다.

(5) 수치해석 결과 연돌효과 저감장치가 가동되고 있는 우측 계단실의 압력은 약 4.8 Pa로 형성되는데 반하여 장치가 설치되지 않는 좌측 계단실의 압력은 7.4 Pa으로 나타나며, 이로부터 연돌효과의 감소효과가 발생됨을 알 수 있다.

(6) 실험과 수치해석의 그래프 경향이 상당히 일치하고 있으므로 향후 실제 건물에 대한 적용시 수치해석 기법을 사용한 설계가 진행될 수 있다.

(7) 순환형 연돌효과 저감장치가 가동되면 연돌효과에 의해 발생하는 압력이 감소하고 이에 따라서 건축물과 외부사이의 유출입 풍량도 감소한다.

후 기

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

References

1. Tamura, G. T. and Wilson, A. G., 1967, Pressure differences caused by chimney effect in three high buildings, ASHRAE Transactions, Vol. 73, No. 2, pp. II.1.1 -II.1.10.
2. Jo, J. H., Yang, I. H., Yeo, M. S., and Kim, K. W., 2002, 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 and design, Vol. 18, No. 7, pp. 169-176.
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. Lee, K. H., Kim, S. M., Park, Y. H., Moon, J. S., and Sohn, J. Y., 2005, A study on the air tightness performance and stack effect characteristics in high-rise apartments, Journal of the architectural institute of Korea planning and design, Vol. 21, No. 12, pp. 279-286.
5. 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.
6. Jo, J. H., 2005, Simulation of pressure distribution and solving the pressure differentials problem in high-rise residential buildings, Journal of the architectural institute of Korea planning and design, Vol. 21, No.11, pp. 269-276.
7. Kim, J. Y. and Kim, J. S., 2015, Study on 3D numerical analysis of stack effect reduction in stairwell of building, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 27, No. 3, pp. 152-157.
8. NIST, 2013, CONTAMW Ver.3.1.

ⓒ SAREK