

## 수직통로의 형상이 연돌효과에 미치는 영향에 관한 수치해석 연구 A Numerical Study on the Influence of the Shaft Geometry on the Stack Effect

전흥균<sup>†</sup> · 추홍록

Heung-Kyun Jeon<sup>†</sup> · Hong-Lok Choo

대구보건대학 소방안전관리과  
(2011. 5. 26. 접수/2011. 8. 12. 채택)

### 요 약

고층건물의 수직통로 형상이 연돌효과의 차압과 중성대 위치에 미치는 영향을 알아보고, 연돌효과의 발생현상을 가시화하기 위하여 3가지 형상의 수직통로, 즉 단순 수직통로, 승강기 수직통로 및 계단실 수직통로에 대하여 CFD 모델인 FDS(ver. 5.3) 프로그램을 사용하여 수치해석 하였다. 연돌효과 초기( $t = 10$  s) 차압은 승강기 수직통로인 경우(79.3 Pa)가 이론식 계산 결과(78 Pa)와 잘 일치하였다.  $t = 300$  s 시점에서 중성대 위치는 3가지 경우 모두 49 m 이상으로 이론식 결과 보다 5 m 이상 높게 나타났다. 수직통로 상부와 하부지점 사이의 최대차압은 수직통로의 구조가 복잡할수록 감소하였다. 연돌효과 가시화를 통하여 수직통로 형상에 따라 연돌효과에 차이가 있다는 것을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

The numerical analyses for three different shafts in geometry of high buildings were carried out by using computational fluid dynamics model (FDS ver.5.3) for the calculation of the pressure difference and the location of the neutral plane and the visualization of stack effect. At 10 seconds of stack effect, the pressure difference of stack effect in the elevator shaft (79.3 Pa) almost corresponded to the theoretical value (78 Pa). At 300 seconds of stack effect, all the neutral planes of three cases were located about 49 m above floor, where was 5 m higher than the theoretical value. The maximum pressure difference between upper and lower position of shaft decreased with increasing of the geometrical complexity of shaft. This study showed that there was the difference of the stack effects among the geometries of shafts with the visualization of stack effect.

**Key words** : Shaft geometry, CFD, Pressure difference, Neutral plane, Visualization of stack effect

### 1. 서 론

최근 고층건물의 건축이 늘어 국내 고층건물의 수가 크게 증가하고 있다. 고층건물은 수직높이가 높고 복잡한 구조이며 거주밀도가 높아 화재피난 시 피난완료에 많은 시간이 소요되어 화재 초기에 진압 및 제어가 되지 않을 경우 대형 화재사고로의 가능성이 매우 높다.

이에 고층건물의 화재피난안전을 확보하기 위해 관련 방재기준을 강화하고 있다.<sup>1)</sup>

고층건물 화재 시 화재피난안전은 제연설비의 성능 확보, 특히 급기가압방식의 차압제연의 경우 제연구역

의 차압형성을 통한 안전한 피난경로 확보가 매우 중요하게 작용한다. 제연구역의 차압형성에 영향을 미치는 요인으로는 연돌효과, 바람, 연소가스의 부력, 공조설비(HVAC)에 의한 강제유동, 승강기 피스톤효과 등이 있다.

연돌효과는 고층건물의 경우 제연구역의 차압형성에 큰 영향을 미치며,<sup>2)</sup> 건물 높이, 수직통로의 위치 및 개수, 엘리베이터 수직구획, 누설틈새 유동통로, 외벽 기밀도, 건물 내·외부 온도차, 공기밀도 등, 많은 요인에 의해 영향을 받는다. 따라서 제연설비 설계 시 그 성능에 영향을 미치는 요인들을 고려한 공학적 설계를 통하여 제연성능을 확보하는 것이 매우 중요하다.

연돌효과에 대한 선행 연구에는 배연창이 설치된 고

<sup>†</sup>E-mail: jeonhk@mail.dhc.ac.kr

층건물에서 연돌효과와 배연성능에 대한 평가,<sup>3)</sup> 단일 단순수직통로의 연돌효과와 중성대에 관한 수치해석 연구,<sup>4)</sup> 연돌효과로 인해 발생하는 실내 압력분포 해석<sup>5)</sup>과 연돌효과 저감대책,<sup>6)</sup> 침기(Infiltration)와 누기(Leakage)에 의한 에너지 손실, 엘리베이터문의 오작동, 틈새소음, 환기불량과 오염공기 확산, 실내 기류속도상승에 따른 재실자의 불쾌감 방지<sup>7)</sup>와 화재 시 적정 차압 형성에 따른 연기확산 방지와 적정 문 개방력 유지에 따른 피난자의 피난장애 방지<sup>8)</sup> 및 급기가 압 제연시스템에 미치는 영향<sup>9)</sup> 등 많은 연구가 있다. 이들 연구는 연돌효과로 인해 발생하는 설비 오작동, 거주자의 불편, 제연 시 과압형성 및 피난장애 등의 부정적 영향과 이에 대한 대책 방안에 대한 내용으로써 연돌효과의 차압 계산은 현장측정 방법과 Network 모델인 CONTAM 프로그램의 수치해석방법을 사용하였다.

이러한 선행 연구 내용과 더불어 고층건물의 연돌효과를 정확히 분석하기 위해서는 연돌효과의 초기 차압 형성 과정 및 중성대의 위치 등 연돌효과의 기체 역학적 특성에 대한 기초 연구가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 고층건물의 연돌효과 특성과 관련하여 수직통로의 형상에 따라 수직통로 내외부의 차압과 중성대 위치에 미치는 영향을 알아보기 위하여 CFD 모델을 사용하여 수치해석을 하였고, 연돌효과 발생 현상도 가시화 하였다. 본 연구의 목적을 위해 사용된 수치해석 모델은 NIST에서 개발된 FDS(ver. 5.3)<sup>10)</sup> 프로그램이며, 연돌효과 모델은 3가지 형상의 단일 수직통로(Single shaft)를 사용하였다. 또 각 경우의 차압과 중성대의 위치에 대한 수치해석 결과를 이론식의 계산결과와 비교하였다.

본 연구의 목적은 연돌효과를 고려한 제연설비설계 시 연돌효과의 차압과 중성대 위치의 정확한 계산을 위한 기초자료를 제공하는데 있다.

## 2. 연돌효과와 중성대 위치<sup>11)</sup>

### 2.1 연돌효과

연돌효과는 건물 내·외부 온도차에 의해 실내공기의 부력이 발생함으로써 수직통로 내부의 공기가 수직 유동하는 현상을 말한다. 연돌효과는 수직 유동방향에 따라 정상연돌효과(Normal stack effect)와 역연돌효과(Reverse stack effect)로 구분한다(Figure 1 참조).

우리나라는 겨울철의 건물 내·외부의 온도차가 크게 발생함으로써 정상연돌효과에 대한 문제점이 많다고 보고되고 있다.<sup>12)</sup>

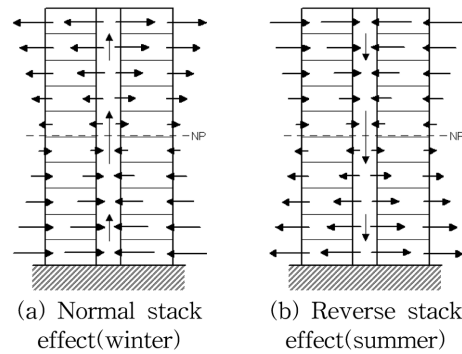
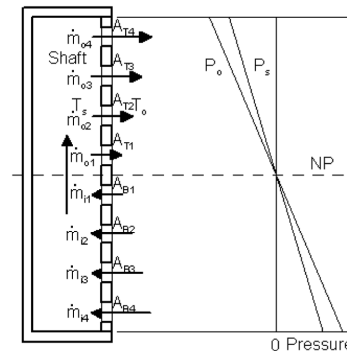
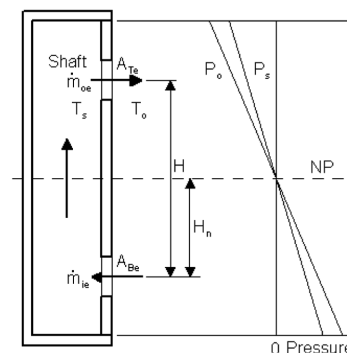


Figure 1. Stack effect of a building.

연돌효과로 인한 내부 수직통로와 외부의 압력차와 관련하여 수직통로내의 부력에 의해 형성되는 상하부 차압에 대해 수직통로 내벽의 마찰손실을 무시하고, 건물높이에 대해 중력가속도와 밀도가 일정하다고 가정하면 수직통로 내부압력( $P_s$ )과 외부압력( $P_o$ )의 차압( $\Delta P_{so}$ )은 다음 식으로 계산된다.



(a) Shaft with multiple openings



(b) Shaft with two effective openings

Figure 2. Location of a neutral plane.

$$\Delta P_{so} = \frac{gP_{atm}}{R} \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_s} \right) z \quad (1)$$

## 2.2 중성대 위치

상기와 같이 연돌효과에 의해 건물 내·외부의 차압이 형성되고 수직높이에 따라 차압의 크기가 변화한다. 이때 내·외부의 압력이 같게 되는 곳이 나타나게 되는데 이를 중성대(Neutral plane, NP)라 한다(Figure 2 참조). 본 연구의 연돌효과 모델에서는 중성대 위치는 수직통로 개구부의 유입·유출 유량에 대한 질량 보존법칙을 적용하여 다음 식으로 계산하였다.

$$\frac{H_n}{H} = \frac{1}{1 + (T_s/T_o)(A_B/A_T)^2} \quad (2)$$

중성대의 정확한 위치를 사용함으로써 개구부의 유량과 압력을 정확히 계산할 수 있고, 이는 제연설비의 설계풍량 계산 시 중성대에서 가장 먼 제연구획의 연돌효과의 차압을 고려한 설계를 통해 제연구역의 과압형성과 이로 인한 피난문 개방력 상승에 따른 피난장애를 방지할 수 있게 된다.

## 3. 컴퓨터 모델링

수직통로의 연돌효과 특성과 관련하여 수직통로내의 차압과 중성대 위치에 대한 계산 및 연돌효과 발생에 대한 가시화를 위하여 FDS(ver. 5.3) 프로그램을 사용하였다.

본 연구의 연돌효과모델은 단순 수직통로(Simplified shaft, Type A), 승강기 수직통로(Elevator shaft, Type B), 계단실 수직통로(Stairwell shaft, Type C), 등 3가지 형상의 단일 수직통로로서 Figure 3에 나타내었다.

승강기의 위치는 연돌효과모델의 중간높이인 15층에 정지한 경우로 하였다. 수직통로의 바닥 단면적은 12 m<sup>2</sup>, 높이는 90 m, 개구부의 폭과 높이는 0.2 m × 0.2 m, 개구부 간격은 3 m, 연돌효과 모델의 격자크기는 0.2 m 이다.

연돌효과가 크게 발생하는 겨울철의 건물 내·외부 온도를 고려하여 외기온도와 수직통로의 내부온도는 각각 -5°C, 15°C를 적용하였고, 연돌효과와 초기 발생에 대한 가시화를 위하여 시뮬레이션 시작 후 5초에서 개구부가 형성되도록 하였다. 전체 시뮬레이션 시간은 300초이다. 압력측정 지점의 간격은 3 m이다. 연돌효과의 중성대 위치는 부압과 정압의 위치와 상호 차압과의 비례식을 적용하여 계산하였고, 이 수치해석 결과를 기초 이론식의 계산 결과와 비교하였다.

한국화재소방학회 논문지, 제25권 제4호, 2011년

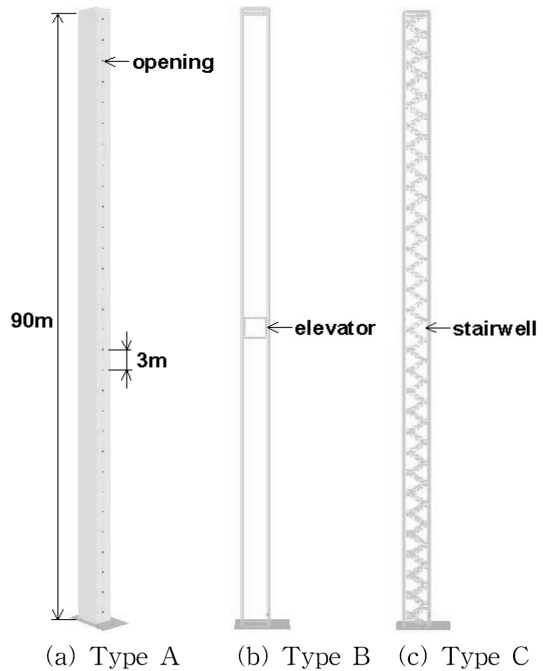


Figure 3. Models of stack effect.

## 4. 결과 및 고찰

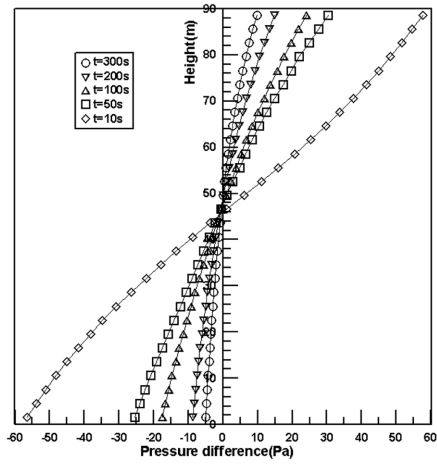
### 4.1 차압과 수직통로 유동

연돌효과의 차압 계산을 위해 CFD 모델인 FDS 프로그램을 사용할 경우 연돌효과의 내·외부 유동에 따른 기체혼합으로 수직통로내의 온도는 시간경과와 더불어 낮아지고, 이 온도변화는 밀도 및 압력에도 영향을 미치게 된다. 본 연구의 경우 차압은 시뮬레이션 후 10초, 50초, 100초, 200초, 300초 시점에서 수치해석 결과를 구하고, 이론식의 계산 결과와 비교하였다. 더불어 시간경과에 대한 감소효과도 함께 살펴보았다.

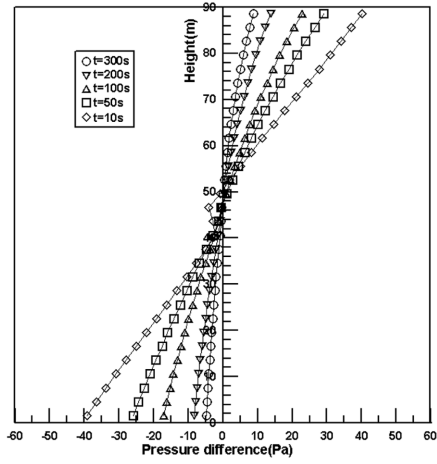
Figure 4는 3가지 형상의 수직통로에 대한 연돌효과의 차압을 나타낸 그림이다.

연돌효과 초기(t=10 s) 중성대에서 가장 먼 상부와 하부 지점의 차압은 단순수직통로의 경우 57.6 Pa, -56.7 Pa, 승강기 수직통로의 경우 40.0 Pa, -39.3 Pa, 계단실 수직통로의 경우 28.8 Pa, -31.5 Pa이다. 상부와 하부 지점의 차압은 수직통로의 구조가 복잡할수록 차압은 감소한다.

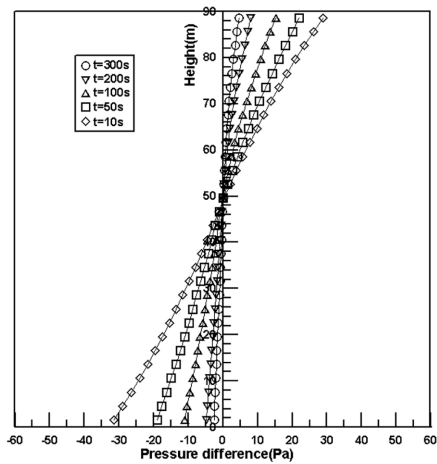
이것은 수직통로의 구조가 복잡할수록 수직통로 내부의 체적 감소량이 커지고, 외기 유입에 의한 상승 유동 시 기체의 유동 저항이 증가하여 압력 상태의 불안정성이 감소되기 때문인 것으로 사료된다.



(a) Simplified shaft

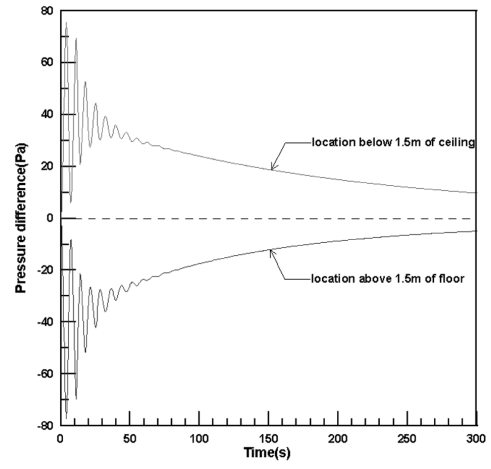


(b) Elevator shaft

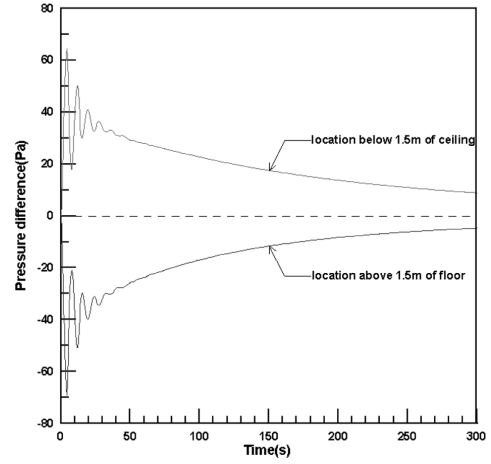


(c) Stairwell shaft

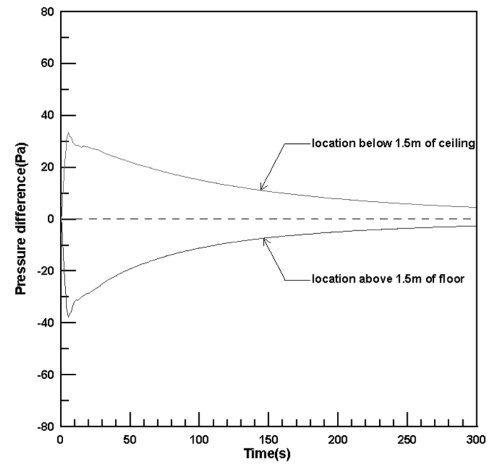
Figure 4. Pressure difference of stack effect.



(a) Simplified shaft



(b) Elevator shaft



(c) Stairwell shaft

Figure 5. Pressure difference at 1F and 30F.

**Table 1.** Max. Pressure Difference ( $\Delta P_{so}$ (Pa))

Type \ t(s)	A	B	C	$\Delta P_{th}$
10	114.3	79.30	60.30	78.00
50	55.80	55.00	41.00	
100	41.40	39.70	26.20	
200	23.60	21.98	12.71	
300	14.66	13.51	7.13	

**Table 2.** Deviation (%) of Max.  $\Delta P_{so}$  to  $\Delta P_{th}$ 

Type \ t(s)	A	B	C
10	46.5	1.7	22.7
50	28.5	29.5	47.4
100	46.7	49.1	66.4
200	69.7	71.8	83.7
300	81.2	82.7	90.9

Figure 5는 3가지 형상의 수직통로에 대해 1층과 30층의 차압 변화를 나타낸 그림이다.

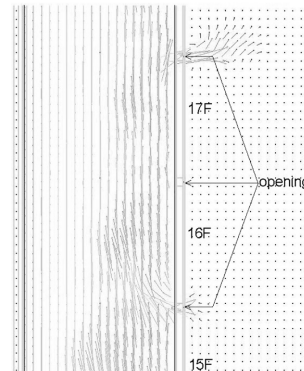
Type A, B, C 경우 차압이 안정되는데 걸리는 시간은 각각 60초, 40초 10초 정도이다. 이것은 수직통로의 구조가 복잡할수록 압력 상태의 불안정성이 감소되었기 때문이다.

Table 1은 개구부 상부와 하부 차압의 합(최대 차압)에 대해 수치해석 결과와 이론식 계산 차압을 나타낸 표이고, Table 2는 이론식 계산 차압에 대한 최대 차압의 %편차를 나타낸 표이다.

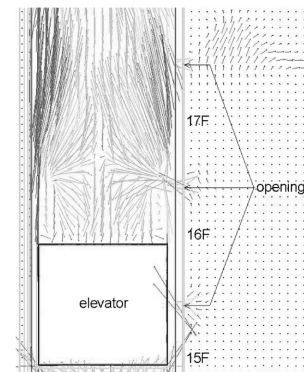
최대 차압은 수직통로의 구조가 복잡할수록, 시간이 경과할수록 감소하고, %편차는 수직통로의 구조가 복잡할수록, 시간이 경과할수록 증가한다.

Figure 6은 3가지 형상의 수직통로에 대한 연돌효과에 대한 가시화 그림으로써 수직통로 중간 위치(15, 16, 17층)의 속도상태를 나타낸다.

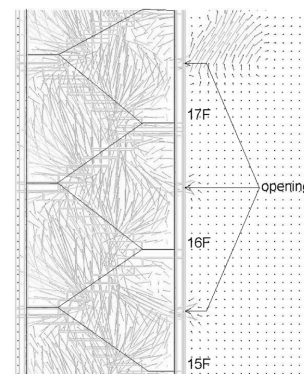
단순 수직통로의 경우 상승유동의 좌측 부분은 층류 상태인 반면, 우측 부분은 난류 상태이다. 이것은 상승유동과 개구부의 유입과 유출 유동과의 상호 작용되기 때문이다. 승강기 수직통로의 경우 승강기 상부의 수직통로 벽면 부근의 상승유속이 크며, 특히 좌측 부분의 상승 유속이 우측 부분의 상승유속보다 더 크다. 이것은 승강기로 인한 유동 단면적이 좁아져 유속이 증가하고, 우측 유동은 개구부의 유입과 유출 유동과 상호작용하여 상승유동에 저항으로 작용하기 때문이다.



(a) Simplified shaft



(b) Elevator shaft



(c) Stairwell shaft

**Figure 6.** Vector profile of velocity at the middle part of shaft ( $t = 10$  s).

계단실 수직통로의 경우 상승유속은 작다. 이것은 계단으로 인해 많은 저항을 받으면서 나선형으로 상승 유동하기 때문이다.

#### 4.2 중성대 위치

연돌효과와 중성대 위치에 대한 수치해석 결과와 이

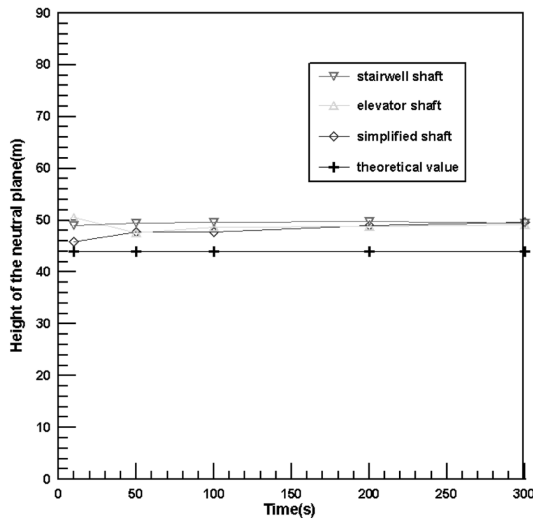


Figure 7. Height of neutral plane.

Table 3. Location of Neutral Plane ( $H_n$ (m))

t(s) \ Type	A	B	C	$H_{n(th)}$
10	45.90	50.50	48.97	43.96
50	47.71	47.61	49.51	
100	47.78	48.67	49.63	
200	49.06	48.79	49.71	
300	49.64	49.12	49.46	

Table 4. Deviation (%) of  $H_n$  to  $H_{n(th)}$

t(s) \ Type	A	B	C
10	4.4	14.9	11.4
50	8.5	8.4	12.6
100	8.7	10.7	12.9
200	11.6	11.0	13.1
300	12.9	11.7	12.5

론식 계산 결과를 Figure 7과 Table 3에 나타내었고, 이론식 계산 결과에 대한 수치해석 결과의 %편차를 Table 4에 나타내었다.

중성대의 위치는 이론식 결과와 비교 시 최소 1.94 m (4.4%, Type A), 최대 6.54 m(14.9%, Type B) 높다. t = 300 s 시점의 중성대 위치( $H_n$ )는 Type A, B, C 경우, 49.64 m, 49.12 m, 49.46 m로서 이론식 결과( $H_{n(th)}$ ) 43.96 m에 비해 5 m 이상 높게 나타났다. 이것은 연돌

효과의 부력에 의한 상승 유동이 수직통로 내벽의 마찰 손실과 승강기와 계단의 유동 저항으로 상부 차압에 영향을 미쳐 차압이 작아져 중성대 위치가 높아졌다고 사료된다.

### 4.3 연돌효과 가시화

연돌효과의 가시화를 위하여 승강기 수직통로와 계

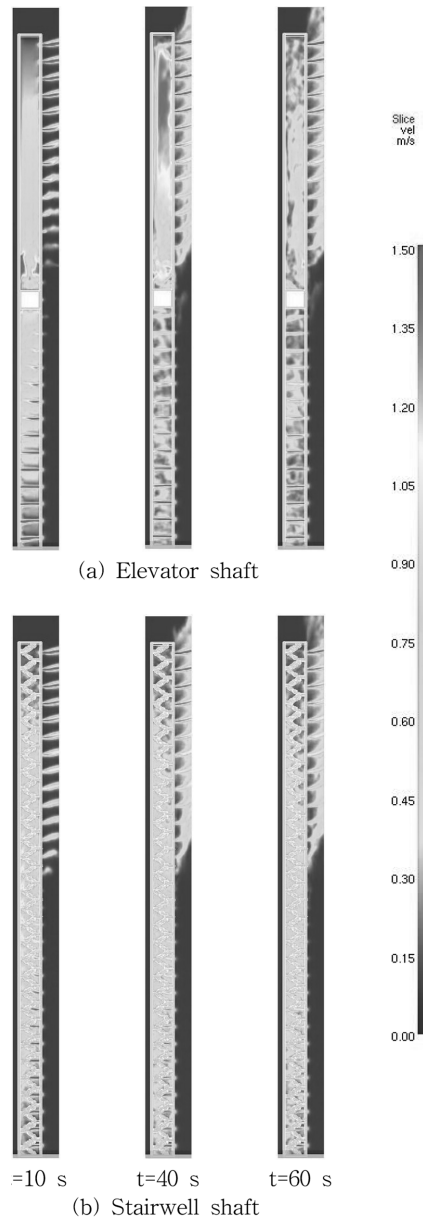


Figure 8. Visualization of stack effect.

단실 수직통로에 대한 초기 속도분포를 Figure 8에 나타내었다.

승강기 수직통로의 경우 중성대의 하부 및 상부 개구부를 통한 유입 및 유출 유동을 볼 수 있다. 수직통로 내부의 상승 유동 속도는 시간이 지날수록 증가하다가  $t=40$  s에서 최대가 되고, 이후 점차 감소한다.

이것은 연돌효과 초기 형성된 차압으로 외기 유입과 수직통로 내부 기체의 유출 유동이 발생하고, 동시에 유입 및 유출 유동으로 내부 상승 유동이 유발되어 서서히 상승속도가 증가하면서 점차 상부로 유동 범위가 확산되면서 최대 유속이 된 후 차압의 감소로 속도가 감소되기 때문이다. 초기에 승강기 상부에서 속도가 크게 나타난 것은 승강기 본체로 인해 수직통로 내부의 유동 단면적이 작아졌기 때문이다.

계단실 수직통로의 경우 중성대의 하부 및 상부 개구부를 통한 유입 및 유출 유동을 볼 수 있으나, 수직통로 내부의 상승 유동 속도는 시간이 지날수록 감소한다. 이것은 차압에 의해 유입유출 유동이 발생하지만, 유입 및 유출 유동을 유발하는 차압의 크기가 계단구조로 인한 내부 상승 유동의 저항력에 비해 상대적으로 약하기 때문인 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고층건물의 수직통로 형상이 연돌효과와 차압과 중성대 위치에 미치는 영향을 알아보기 위하여 3가지 형상의 수직통로에 대하여 CFD 모델인 FDS(ver.5.3) 프로그램을 사용하여 수치해석 하였다. 본 연구의 수치해석 결과와 수직통로의 연돌효과 가시화를 통하여 연돌효과와 기체역학적 차이를 이해할 수 있었고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연돌효과 초기( $t=10$  s) 차압은 승강기 수직통로의 경우 79.3 Pa로써 이론식 계산 결과 78 Pa와 잘 일치하였다.
2. 중성대 위치는 3가지 경우 모두 이론식 계산 결과 보다 높으며,  $t=300$  s 시점에서 49 m 이상으로 이론식 결과 보다 5 m 이상 높게 나타났다.
3. 수직통로 상부와 하부지점 사이의 최대차압은 수직통로 구조가 복잡할수록 감소한다.

CFD를 이용한 연돌효과와 차압과 중성대 위치의 정확한 계산을 통하여 제연성능의 안정성을 보장할 수 있는 제연설비를 설계하는데 기여할 것으로 기대한다.

## 기호표시

$A_B$  : area of bottom opening

$A_T$  : area of top opening  
 $g$  : acceleration of gravity  
 $H$  : height of a continuous opening or the distance from the bottom opening to the top opening  
 $H_n$  : distance from the bottom of the shaft to the neutral plane  
 $H_{n(th)}$  : distance of the neutral plane calculated by theoretical equation  
 $H_s$  : height of the shaft  
 $\dot{m}_i$  : mass flow rate into the shaft  
 $\dot{m}_o$  : mass flow rate from the shaft  
 $P_{atm}$  : absolute atmospheric pressure  
 $P_o$  : air pressure outside the shaft  
 $P_s$  : air pressure inside the shaft  
 $\Delta P_{so}$  : pressure difference from inside to the outside  
 $\Delta P_{th}$  : pressure difference calculated by theoretical equation  
 $R$  : gas constant of air  
 $T_o$  : absolute temperature of outside air  
 $T_s$  : absolute temperature of air in the shaft  
 $z$  : elevation

## 참고문헌

1. 건축기획과, “(초)고층 건축물 방재대책 추진”, 서울시 주택본부, pp.1-10(2011).
2. John H. Klote and James A. Milke, “Principles of Smoke Management”, ASHRAE, SFPE, p.69(2002).
3. 임채현, 김범규, 박용환, “고층건물에서 연돌효과 및 외기풍속에 따른 배연창의 배연성능 평가”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.23, No.6, pp.82-90(2009).
4. 전홍균, 최영상, 추홍록, “단일 단순수직통로의 연돌효과와 중성대에 관한 수치해석 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.23, No.5, pp.143-152(2009).
5. 조재훈, 여명석, 김광우, “고층 주거건물에서의 연돌효과로 인한 압력분포에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, Vol.21, No.5, pp.207-214(2005).
6. 박동률, 임현우, 이중훈, 송두삼, “고층 주거건물의 연돌효과 저감대책 소프트 냉각법”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, Vol.27, No.1, pp.773-776(2007).
7. 양인호, 여명석, 조재훈, 김광우, “고층건물에서의 연돌효과 시뮬레이션”, 설비공학논문집, Vol.14, No.6, pp.456-467(2002).
8. 김진수, “초고층 건물에 나타나는 연돌효과”, 한국화재소방학회지, Vol.3, No.1, pp.14-20(2007).
9. 김정엽, “연돌효과가 급기가압 제연시스템에 미치는 영향에 대한 현장실험”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.22, No.3, pp.194-200(2008).

10. Kevin McGrattan, Bryan Klein, Simo Hostikka, Jason Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", NIST, p.35(2008).
11. John H. Klote and James A. Milke, "Principles of Smoke Management", ASHRAE, SFPE, pp.66-85 (2002).
12. 김학중, 김범규, 박용환, 임채현, "엘리베이터 승강로 형식별 압력변동에 관한 실험 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol.24, No.3, p.141(2010).