

초고층주상복합건물에서 배연창 개방이 연돌효과에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

Experiments on the Influence of Opening of Natural Smoke Ventilators on the Stack Effect
in High-rise Mixed-use Residential Buildings

임채현* · 김범규** · 박용환***

Lim, Chae-Hyun · Kim, Bum-Gyu · Park, Yong-Hwan

ABSTRACT

The stack effect in high-rise buildings is expected more significant at nights in winter due to the large temperature difference between the inside and outside of the buildings. However, the existence of large openings such as natural ventilators on the floor may effect the position of neutral plane, smoke spread at fire and thus obstruct the door openings for rescue. In this paper, the vertical and horizontal pressure distribution with different openings of natural smoke ventilators was experimentally analyzed by investigating pressure differentials.

key words : Stack effect, High-rise building, Neutral plane, Smoke ventilator, Pressure difference

요 약

초고층 주상복합 건축물은 구조적으로 수직샤프트의 길이가 길고 24시간 냉난방이 이루어지는 용도적인 특성으로 혹서기 심야시간대에 실내외 온도차에 의한 연돌효과가 다른 건물보다 크게 발생한다. 또한, 하부 층에는 개구율이 높은 판매시설 및 지하주차장 등이 위치하고 있어 중성대가 상대적으로 낮게 형성되는 압력분포 특성을 가지고 있다. 이러한 압력분포는 화재위험도가 높은 하부 층에서 화재발생 시 중성대 이상층 전체가 연기확산의 위험에 노출되고 출입문 개방장애 등의 피난장애를 가져올 수 있음을 예측할 수 있다. 이에 본 연구에서는 초고층주상복합건축물에서의 수직 및 수평 압력분포를 정상조건 및 배연창 개방조건에 따라 계단실, 부속실, 복도에서의 압력을 측정하고 압력분포특성을 분석하였다.

핵심용어 : 연돌효과, 초고층건물, 중성대, 배연창, 차압

1. 서 론

우리나라의 겨울철은 지리적으로 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 춥고 건조한 날씨를 가진다. 이렇게 추운 외기온도는 건물의 실내외 온도차를 크게 하고 수직샤프트 높이에 비례하여 연돌효과(Stack effect)를 증대시킨다.

초고층건물에서에서 발생하는 연돌효과의 문제점은 침기·누기에 의한 소음, 엘리베이터문의 오동작, 에너지손실 및 거주자의 불쾌감 등 건축적인 측면에서의 연구 활동은 지속적으로 진행되어왔으나 소방방재적인 측면에서의 피난안전 및 연기확산에 대한 연구는 초기단계인 실정이다.(임채현 등, 2008 : 김정엽, 2007 : 구성한 등, 2005 : 조재훈, 2005)

고층건물에서의 화재 시 연기의 위험성은 MGM Grand Hotel 화재(1980), Meridian Plaza 화재(1991), World Trade

Center 화재(2001), Windsor Tower 화재(2005) 등의 사례를 통해 알 수 있다. 특히, 최근건립이 급증하고 있는 초고층주상복합건물의 경우 건물의 특성 상 수직샤프트의 길이가 길고 혹서기 심야시간대 주거시설의 난방으로 다른 용도의 건물에 비해 실내외 온도차가 크게 발생하여 연돌효과가 크게 되고 상대적으로 화재의 위험성이 높은 판매시설이나 위락시설이 저층부에 위치하여 화재 발생 시 연돌효과에 의한 연기 확산이나 피난장애 등의 문제점이 크게 발생한다. 이러한 연돌효과의 문제점 및 위험성은 건물의 압력분포에 따라 결정되는데 수직압력분포와 수평압력분포로 구분할 수 있다. 수직 압력분포는 연돌효과에 의한 차압과 중성대의 높이에 따라 결정되고 수평압력분포는 구획요소의 압력분담률이 연돌효과와 함께 작용하여 수평압력분포를 형성한다. 이렇게 형성되는 압력분포는 건물 내에서 수평 또는 수직방향으로의 기류흐름

*정희원 · 호서대학교대학원 소방학과, 울산광역시 시설관리공단(E-mail:lch1971@hanmail.net)

**호서대학교대학원 소방학과

***호서대학교 소방방재학과 교수

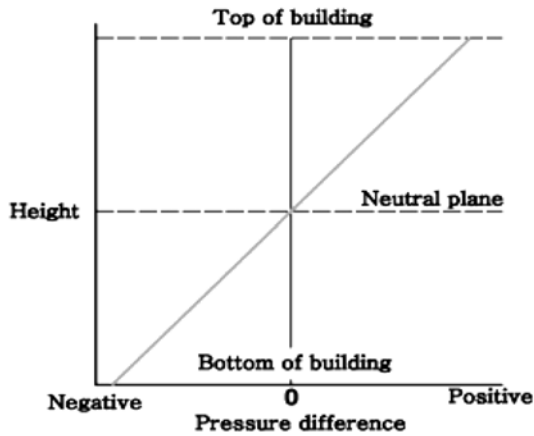


Fig 1. Pressure differences during normal stack effect.

을 가지는데 이러한 기류흐름은 화재발생시 연기확산 및 피난문의 개방/폐쇄장애를 가져올 수 있다.

Fig. 1에서는 정상연돌효과를 설명한 그림으로 대기압과 실내 압이 같은 중성대를 기준으로 하부는 대기가 실내로 유입하고 상부는 실내기류가 대기로 유출하며 연돌효과를 설명하고 있다. 반대로 여름철에 발생하는 연돌효과는 대기온도가 높고 실내 온도가 낮아 정상연돌효과와 반대인 역 연돌효과(Reverse stack effect)가 발생되는데 국내에서는 그 크기가 작아 일반적으로 고려하지 않는다.

연돌효과에 의해 발생하는 차압의 크기는 식(1)과 같다. (Tamura, 1994)

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

여기서, ΔP_{so} : 연돌효과에 의한 차압(Pa)

g : 중력가속도(m/s^2)

P_{atm} : 표준대기압(Pa)

R : 기체상수($J/kg \cdot K$)

K_s : 계수(3,460)

T_o : 외부공기의 절대온도(K)

T_s : 내부공기(샤프트)의 절대온도(K)

h : 중성대로부터 높이(m)

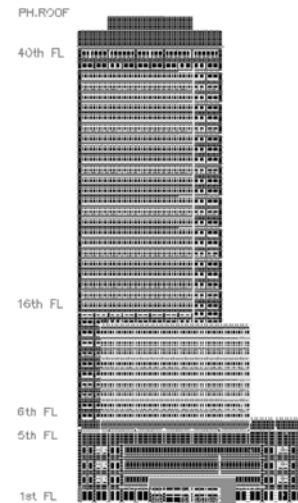
2. 현장측정

측정 대상 건물은 최근 건립이 급증하고 있는 초고층건물 중 배연창이 설치된 지하6층, 지상40층, 높이168m 규모의 서울소재 주상복합건물로서, 지하6층~지하2층은 주차장, 지하1층~5층은 판매시설, 6층~39층 오피스텔, 40층은 판매시설로 구성되어 있다.

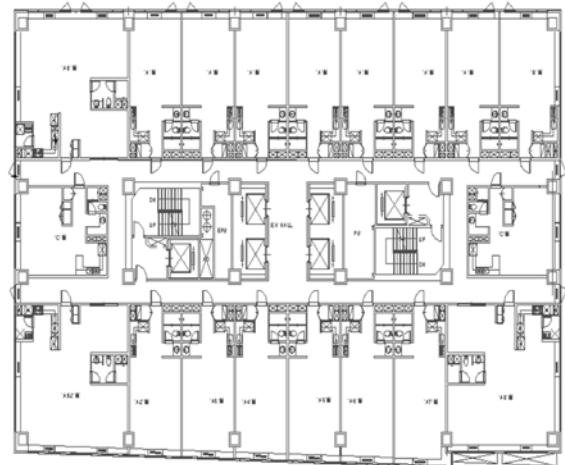
구조는 2개의 엘리베이터와 계단실이 있고 그 주위에 복도가 배치되어 있으며 외부와 면하여 전용공간이 배치된 중앙 코어방식의 건물로서 외벽은 커튼월(Curtain wall) 방식으로 되어 있다. 건축법 (국토해양부, 2008)에 따른 배연창은 오피스텔이 있는 6층부터 39층까지는 설치되어 있으며 화재 발생 시 화재층 및 직상층을 개방하는 방식으로 구성되어 있다.

Fig. 2에서는 측정대상 건물의 입면 및 평면구조를 나타내고 있다.

현장측정은 2008년 12월 19일부터 23일까지 5일간 빌딩 이용객이 가장 적은 새벽시간대에 이루어졌다. 측정 시 외기 조건은 Table 1, 실내온도조건은 Table 2에 나타냈고, 주요 측정 장비의 세부사항은 Table 3과 같다.



(a) Floor structures of the building



(b) Drawing of the typical building floor

Fig 2. Structures of the test building

Table 1. Climatic condition of the outside

Case	Temperature	Wind velocity
5°C	4.8°C~5.8°C	0.3 m/s~1.1 m/s
-1°C	-0.8°C~-1.4°C	0.4 m/s~0.7 m/s
-5°C	-4.3°C~-5.4°C	0.7 m/s~1.4 m/s

Table 2. Indoor temperatures

	Room	Corridor	Lobby	Stairway
Temperature	22°C	21°C	20°C	19°C

Table 3. Details of the measuring instruments

Instrument	Model	Range	Resolution	Accuracy
Pressure gauge	RUSKA(USA) series 6200	0~130 kPa	1 Pa	±1.0 Pa
Digital manometer	DWYER(USA) series 477	0~5 kPa	1 Pa	±0.5%
Digital push pull gauge	SHIMPO(Japan) FGN-50B	±50 Kgf	10 g	±0.5%
Velocity gauge	TSI(Japan) 8386	5~60°C	0.1°C	±0.3°C
		0~50 m/s	0.01 m/s	±1.5%

Table 4. Specification of natural smoke ventilator

Open story	Size (m)	Valid area (m ²)	Quantity (EA)	Total valid area (m ²)
38,39F	1×1.3	0.65	8	8.32
	0.3×1.3	0.39	8	
19,20F	1×1.3	0.65	8	8.32
	0.3×1.3	0.39	8	
1F	0.9×2.1	1.89	5	9.45

다음과 같이 외기온도조건에 따라 배연창이 개방되지 않는 정상조건 및 배연창 개방조건으로 구분하여 압력을 측정하였다.

(1) 정상조건에서 빌딩 전 층의 계단실, 부속실, 복도의 압력측정

(2-1) 빌딩의 상부에 위치한 38층39층의 배연창 개방조건에서 39층, 29층, 19층, 9층 그리고 1층의 계단실, 부속실, 복도의 압력측정

(2-2) 빌딩의 중간에 위치한 19층20층의 배연창 개방조건에서 39층, 29층, 19층, 9층 그리고 1층의 계단실, 부속실, 복도의 압력측정

(2-3) 빌딩의 하부에 위치한 1층의 개방조건에서 39층, 29층, 19층, 9층 그리고 1층의 계단실, 부속실, 복도의 압력측정

여기서, 배연창 개방조건은 심야시간대 오피스텔의 특성상 세대 내의 배연창은 개방하지 못하고 화재 층 및 직상 층의 복도 양 끝에 설치된 4개의 배연창과 피난을 가정한 부속실 및 계단실의 문을 개방하여 절대압력을 측정하였으며 하부층 개방조건에서는 1층이 배연창 설치대상이 아니므로 2개 층의 배연창 개방면적에 상당하는 유효면적의 출입문을 개방하여 절대압력을 측정하였다. 배연창에 대한 세부사항은 Table 4와 같다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 정상조건에서의 압력분포

피난계획에서는 일반적으로 거실→복도→부속실→계단실→옥외의 순으로 피난이 이루어진다. 여기서 보통 복도를 1차 안전구역, 부속실을 2차 안전구역 그리고 계단실을 3차 안전구역이라고 불리어진다. 화재발생 시 이러한 안전구역들을 통한 피난동선이 연기의 확산경로와 동일하여 피난시간이

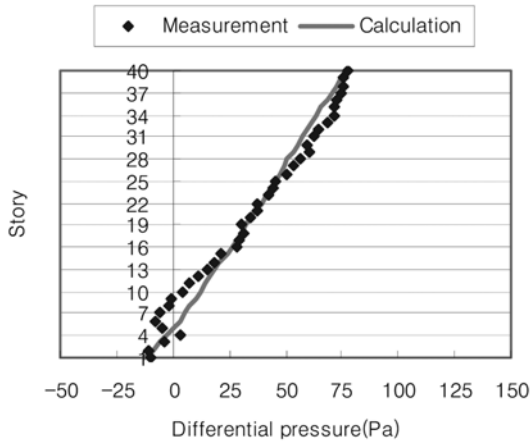
상대적으로 긴 초고층건물에서 재실자의 안전한 피난과 최적 제연시스템 설계를 위해서는 건물의 압력분포 특성분석을 통하여 이루어져야 할 것이다.

먼저, 각 층의 계단실에서 피난 층인 1층까지의 수직피난경로에서 발생하는 압력분포를 분석하여 보면 수직샤프트의 높이와 실내의 온도차에 비례하여 증가하는 차압과 빌딩의 상층과 하층간의 개구부 비율에 따라 달라지는 중성대의 위치가 수직압력분포의 중요한 영향인자가 된다.

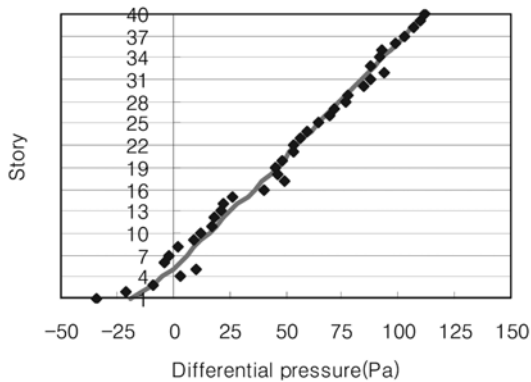
Fig. 3은 계단실과 빌딩 외부와의 차압을 이론과 측정치를 비교하여 나타낸 것으로 외기온도가 낮아질수록 실내의 온도차가 크게 발생하여 차압이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 측정된 차압은 대기온도 5°C에서 89 Pa, -1°C에서 146 Pa, -5°C에서 163 Pa로 이론에 의해 계산된 5°C에서 90 Pa, -1°C에서 131 Pa, -5°C에서 159 Pa과 전반적으로 유사하게 나타났다. 단, 이론과 측정치의 편차는 1~5층에 위치한 판매시설이 다른 층에 비해 바닥면적 및 내부구획이 넓게 구성되어 있다는 점과 빌딩 6~15층에 위치한 중앙을 관통하는 10m×36m 크기의 중정 위치 및 외부 바람의 영향에 의해 나타나는 것으로 판단된다.

중성대의 형성위치 또한 건물의 기밀도 및 개구비율 등에 따라 영향을 받는데, 본 연구대상인 빌딩에서는 1층 로비 3면에 분산된 출입구와 지하주차장 램프를 통한 외기 유입 등으로 저층부의 개구비율이 상대적으로 크게 나타나 지면에서 전체 빌딩 높이의 16% 전후의 높이에 위치한 6층 정도에서 중성대가 형성되었다. 이같이 낮게 형성되는 중성대는 최근 건립이 급증하고 있는 주상복합건물의 공통된 문제점으로 저층부에는 화재의 위험성이 상대적으로 높은 판매시설과 위락시설이, 중·상층부에는 주거시설이 배치되어 있다. 판매시설이나 위락시설에서 화재발생 시 중성대 이상 층인 주거시설 전체가 연기로 오염될 수 있으며, 계단실에서는 연돌효과에 의한 과압으로 피난문의 개방이나 폐쇄에 장애를 가져올 수 있는 문제점을 가지고 있다.

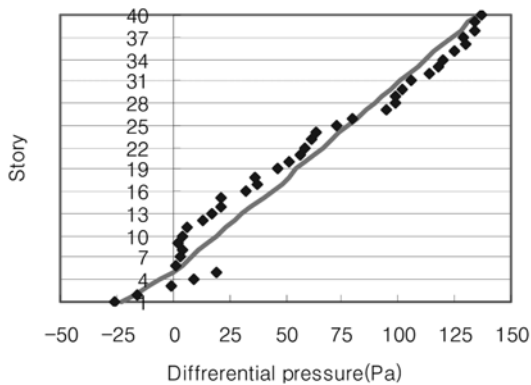
또한, 수평피난경로인 거실, 복도, 부속실 그리고 계단실에서 발생하는 압력분포 분석결과, 중성대를 기준으로 위쪽은 실내압이 대기압보다 높아 실내공기가 대기로 유출되고 아래쪽은 실내압이 대기압보다 낮아 대기가 실내로 유입되는 기류흐름을 가지는 것을 알 수 있었다. 이것은 각 층별 거실, 복도, 부속실 그리고 계단실까지의 수평적 압력분포에 따라 형성되는 기류흐름에 의한 것으로서 각 층에서 발생하는 연돌효과로 인해 발생하는 차압형성으로 인해 공기흐름을 발생시키기 때문인 것으로 분석된다.



(a) At ambient temperature of 5°C



(b) At ambient temperature of -1°C



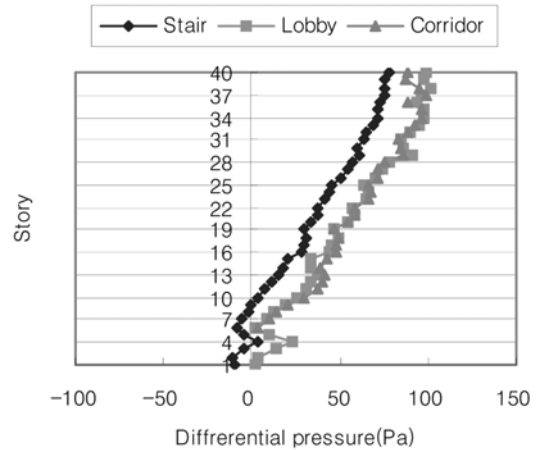
(c) At ambient temperature of -5°C

Fig 3. Pressure differences between stairway and atmosphere

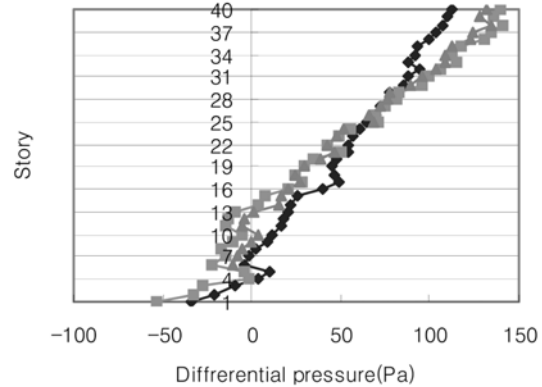
Fig. 4는 계단실, 부속실 및 복도 압력의 빌딩 외부 압력과 차압을 나타낸 것으로서 연돌효과에 의한 차압 외에도 공기조화설비에 의한 실내 가압이 압력분포에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

또한, 1층에서 5층까지의 판매시설은 오피스텔층보다 바닥면적 및 내부구획이 넓어 압력분포의 차이를 보이고 측정시간대 난방이 이루어지지 않아 온도차가 크게 발생하는 등 측정된 차압에는 다른 요인들이 추가로 작용된 것으로 판단된다.

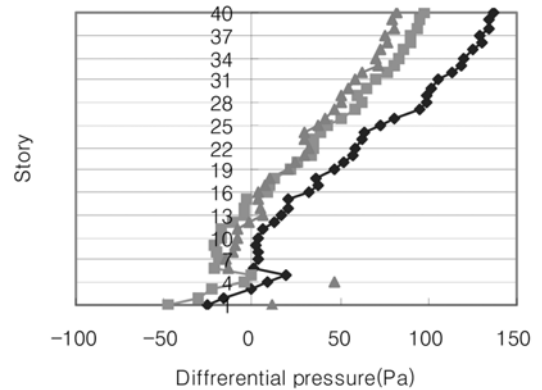
대기온도 5°C의 경우 계단실의 압력보다 부속실 및 복도의 압력이 10 Pa~31 Pa정도 크게 나타났는데 이러한 현상은 계



(a) At ambient temperature of 5°C



(b) At ambient temperature of -1°C



(c) At ambient temperature of -5°C

Fig 4. Pressure differences between stairway, lobby, corridor and atmosphere

단실에서 발생되는 연돌효과보다 난방기류에 의한 압력상승이 크게 작용하여 복도 및 부속실의 압력이 상대적으로 높게 형성된 것으로 판단된다. 그러므로 부속실 및 복도에서의 압력은 계단실과 달리 중성대가 형성되지 않고 모두 양압의 영역에 형성되어 전 층에 걸쳐 계단실로의 공기의 유입이 일어날 수 있음을 예측할 수 있다.

대기온도 -1°C의 경우 26층~27층을 중심으로 계단실의 압력보다 부속실 및 복도의 압력이 -31 Pa~34 Pa정도의 차압을 보였는데 하부층에서는 계단실의 압력보다 부속실 및 복도의 압력이 낮게 나타났으며 상부층에서는 계단실의 압력보다 부

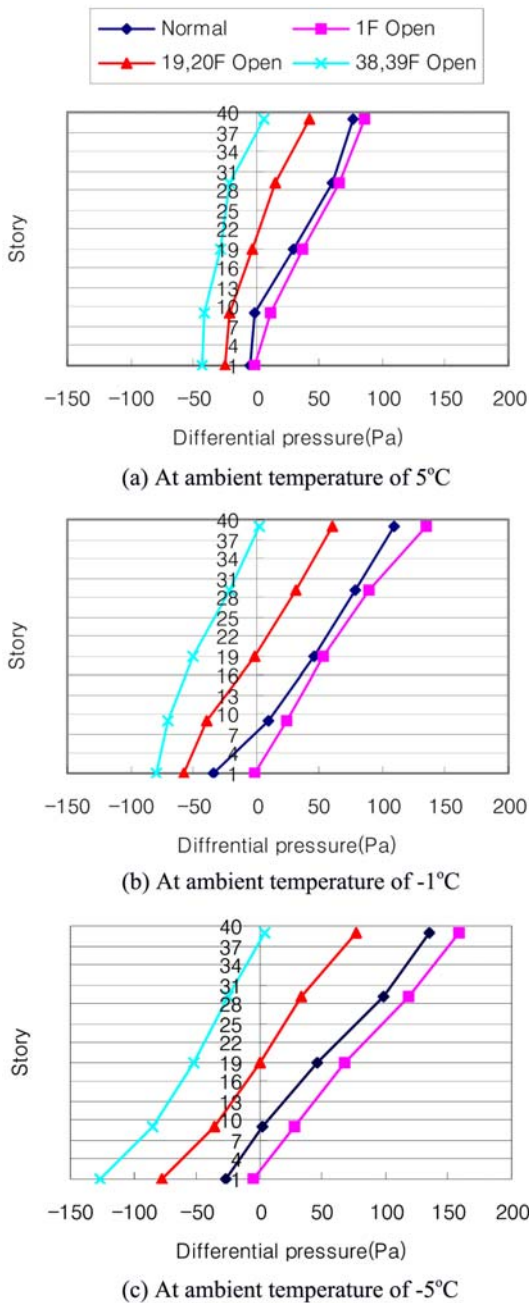


Fig 5. Pressure differences with the opening condition of natural smoke ventilator

속실 및 복도의 압력이 높게 나타났다. 이러한 현상은 연돌 효과에 의한 수직압력분포 외에 26층~27층 이하의 하부 층은 계단실의 압력이 높아 계단실의 공기가 실내로 유출되고 그 상부 층은 계단실의 압력이 낮아 실내 공기가 유입되는 수평적 압력분포의 공기 흐름을 예측할 수 있다.

대기온도 -5°C의 경우 계단실의 압력보다 부속실 및 복도의 압력이 -11 Pa~-55 Pa정도 낮게 나타났는데 이러한 현상은 계단실에서 발생하는 연돌효과가 크게 작용하여 전 층에 걸쳐 계단실의 압력이 상대적으로 높게 형성된 것으로 판단된다. 그러므로 상대적으로 높은 계단실의 압력은 부속실 및 복도에서 계단실로의 공기유입을 방지하지만 계단실의 공기가 실내로 유입될 수 있음을 예측할 수 있다.

3.2 배연창 개방조건에서 압력분포

Fig. 5는 배연창 개방에 따른 계단실과 빌딩외부와의 차압을 나타낸 것으로서 대기온도 변화에 따라 차압은 증가하고 중성대는 배연창 개방 층 쪽으로 이동하는 압력분포 특성을 볼 수 있다. 측정시나리오에서 상부 층인 38, 39층의 배연창 개방조건은 이하 전 층의 계단실 압력이 부압(Negative pressure)영역으로 형성되고 하부 층인 1층 개방조건에서는 이상 전 층의 계단실 압력이 양압(Positive pressure)영역으로 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 압력분포는 화재발생 시 연기의 거동과 밀접한 관계가 있어서 하부 층에서 배연창이 개방될 경우 연기의 부력이나 팽창력보다 연돌효과에 의한 유입기류가 강하게 작용하거나, 개방된 배연창으로 외기 바람이 유입될 경우 수직 샤프트로 유입된 연기는 강력한 연돌효과가 구동력이 되어 상부층을 연기로 오염시킬 수 있으며 상층부에서는 연돌효과에 의한 차압으로 피난 시 계단실 문의 개방장애를 가져올 수 있다. 차압이 가장 크게 발생하는 대기온도 -5°C의 경우 38, 39층의 배연창 개방조건에서는 1층에서 -126 Pa의 최대차압이 발생하였으며 1층 개방조건에서는 39층에서 159 Pa의 최대차압이 발생하였다.

38, 39층의 배연창 개방조건에서의 1층 부속실문 개방력은 130 N정도, 1층의 개방조건에서의 39층 부속실문 개방력은 140 N정도로 국가화재안전기준(NFSC501A, 2007)에서의 110 N이하를 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 피난을 위해 부속실과 계단실문이 동시에 개방할 경우 연돌효과에 의한 공기흐름으로 계단실문이 완전히 닫히지 않아 연기 및 화재 확산이 이루어 질 수 있음을 예측할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 초고층 주상복합건물에서 발생하는 연돌효과가 피난 및 연기확산에 미치는 영향을 알고자, 평상시와 배연창 개방 조건으로 구분하여 현장측정을 실시하여 다음과 같이 초고층빌딩의 압력분포 특성을 파악하였다.

- 1) 배연창이 개방되지 않는 정상조건에서 수직압력분포는 연돌효과에 의해 발생하는 차압에 의해 보통 결정되어진다. 그런데 수직샤프트의 길이가 길고, 24시간 냉난방이 이루어지는 용도특성으로 흡서기 심야시간대에 실내외 온도차에 의해 연돌효과가 크게 발생하였다. 대기온도별 계단실과 빌딩 외부와의 차압은 측정결과는 5°C에서는 88 Pa, -1°C에서는 146 Pa, -5°C에서는 163 Pa이고 계산결과는 5°C는 90 Pa, -1°C는 131 Pa, -5°C는 159 Pa로서 측정결과 및 계산결과가 전반적으로 유사하게 나타났다. 중성대의 형성은 주상복합건물의 특성상 하부 층의 개구율이 커서 건물높이의 16% 전후인 6층 정도에 형성되었는데, 이러한 압력분포는 화재위험도가 높은 빌딩의 하부 층에서 화재 발생 시 중성대로부터 상부 층인 오피스텔 전체가 연기확산의 위험에 노출되고, 출입문 개방장애 등의 피난장애를 가져올 수 있음을 예측할 수 있다.
- 2) 정상조건에서 수평압력분포는 중성대를 기준으로 위쪽은

실내압이 대기압보다 높아 실내공기가 빌딩 외부로 유출되고 아래쪽은 실내압이 대기압보다 낮아 외기가 실내로 유입되는 공기흐름을 나타내지만 건물 기밀도, 구획 및 난방기류 등에 의한 수평압력분포에도 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 수평압력분포는 대기와 수직샤프트의 온도차에 의해 발생하는 차압이 수평경로인 거실, 복도, 부속실 등의 구획에 분담되어 나타나는 압력분포로서, 대기온도 5°C의 경우, 연돌효과보다 난방기류에 의한 압력상승이 크게 작용하여 계단실의 압력이 낮게 나타났고, 대기온도 -5°C의 경우, 연돌효과가 강하게 작용하여 계단실의 압력을 상대적으로 높게 형성하는 것으로 판단된다.

- 3) 배연창 개방에 따른 계단실의 압력분포는 외기의 유입으로 차압은 증가하고, 중성대는 배연창의 개방한 층 쪽으로 이동하는 특성을 확인할 수 있었다. 대기온도 -5°C 이고 38, 39층의 배연창을 개방조건은 1층에서 -126 Pa의 최대 차압이 발생하였으며, 1층 개방조건에서는 40층에서 159 Pa의 최대 차압이 발생하였다. 이러한 최대차압은 출입문 개방장애를 가져오는데 38, 39층의 배연창 개방조건에서의 1층 부속실문 개방력은 130 N정도, 1층 개방조건에서의 39층 부속실문 개방력은 140 N정도로 국가화재안전기준에서의 110 N이하를 초과하는 것으로 나타났다. 그리고 피난을 위해 부속실과 계단실문이 동시에 개방할 경우, 연돌효과에 의한 기류흐름으로 계단실문이 완전히 닫히지 않아 연기 및 화재확산이 이루어

질 수 있음을 예측할 수 있다.

- 4) 연돌효과 평가는 재실자의 안전에 직결된 중요한 사항이므로 국내 건축 환경에 맞는 현장측정과 실험을 통한 데이터베이스 구축 및 유체흐름의 종합적인 분석과 예측을 위한 시뮬레이션 등 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

구성한, 조재훈, 여명석, 김광우 (2005) 실측과 시뮬레이션을 통한 초고층 주거건물에서의 연돌효과 문제의 해결. **한국주거학회논문집**, 한국주거학회, 제16권, 제4호, pp. 73-80.

국도해양부 (2008) **건축설비의 설비기준 등에 관한 규칙 제14조**.

김정엽 (2007) 연돌효과가 급기압 제연시스템에 미치는 영향에 대한 현장실험. **한국화재소방학회논문지**, 한국화재소방학회, 제22권, 제3호, pp. 194-200.

임채현, 김범규, 여용주, 박용환 (2008) 배연창 및 외기풍속이 초고층건축물의 연돌효과에 미치는 영향. **한국화재소방학회논문지**, 한국화재소방학회, 제22권, 제4호, pp. 20-26.

조재훈 (2005) 고층 주거건물에서의 압력분포 예측을 통한 압력차 문제 평가. **대한건축학회논문집**, 대한건축학회, 제21권, 제11호, pp. 327-333.

NFSC501A (2007) **특별피난계단의 계단실 및 부속실 제연설비의 화재안전기준**.

Tamura G.T. (1994) *Smoke Movement & Control In High-rise Building*, NFPA.

◎ 논문접수일 : 09년 05월 15일

◎ 심사의뢰일 : 09년 05월 15일

◎ 심사완료일 : 09년 05월 25일