

배연창 및 외기풍속이 초고층 건축물의 연돌효과에 미치는 영향 The Influence of Natural Smoke Ventilators and Wind Velocities on the Stack effect in High-rise Buildings

임채현[†] · 김범규 · 여용주 · 박용환*

Chae-Hyun Lim[†] · Bum-Gyu Kim · Yong-Ju Yeo · Yong-Hwan Park*

호서대학교 대학원 소방학과, *호서대학교 소방방재학과
(2008. 6. 18. 접수/2008. 11. 6. 채택)

요 약

최근 급증하고 있는 초고층건축물의 건립에 있어 건축법에서 규정하는 자연제연방식인 배연창이 바람의 영향과 함께 연돌효과에 미치는 영향을 네트워크 모델인 CONTAMW를 통해 분석하였다. 초고층건축물에서 연돌효과는 배연창 개방 및 외기풍속에 따라 중성대의 위치형성에 중요한 영향을 주는 것으로 나타났다. 배연창 개방은 중성대를 개방층 쪽으로 이동시켰으며, 외기풍속의 영향은 중성대를 고층부로 상향 이동시키는 것으로 분석되었다. 또한, 화재조건에서 바람의 영향을 고려하지 않을 경우 화재실의 부력 및 팽창으로 실내공기가 배출되는 정상적으로 배연성능을 보였으나, 바람의 영향을 고려할 경우 외기풍속이 빠를수록 화재실의 부력 및 팽창보다 바람의 영향이 크게 작용하여 오히려 외기가 유입되는 비정상적인 배연성능을 나타낼 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

The performance of natural smoke ventilators in High-rise buildings was analyzed by investigating the stack effect depending on the wind velocities using CONTAMW tool. The results showed that the opening of smoke ventilators can influence on the stack effect in the building thus moving the position of the neutral plane toward the opened smoke ventilators. The outside wind velocities can move up the neutral plane toward the top of the building thus increasing pressure differentials at the bottom of the building. The smoke ventilators can maintain its normal performance without outside wind, however, strong outside wind can prevent natural smoke exhaust due to the infiltration of outside air at the ventilators.

Key words : Stack effect, Wind velocity, High-rise building, Natural smoke ventilator, CONTAMW

1. 서 론

최근 우리나라는 생활수준의 향상과 함께 도심지역의 인구밀도가 높아짐에 따라 대도시를 중심으로 주거, 상업 및 업무용도의 초고층건축물의 건립이 급증하고 있다. 초고층 건축물은 일반건축물에 비해 화재 등 재난사고에 많은 취약성을 가지고 있다. 특히, 초고층건축물에서의 수직샤프트는 연돌효과에 의한 강력한 상승기류로 화재발생시 상층부로의 연소가스 확산에 가장 큰 원인이 되어 재실자의 피난안전을 위협

하고 있다.

이러한 연기의 거동을 제어하여 재실자의 안전한 피난과 원활한 소화활동을 도모하기 위한 제연방식으로 자연제연방식인 배연창과 기계제연방식인 제연설비로 구분할 수 있다.^{1,2)}

본 연구에서는 건축법에서 규정된 화재 시 연기배출을 통해 재실자의 안전 및 피난을 돕기 위해 설치하는 배연창이 상대적으로 큰 외기풍속 및 연돌효과(Stack effect)를 가지는 초고층건축물에서 적용될 경우 화재층 연기배출과 관련된 평면 및 수직샤프트의 압력과 기류 특성의 변화를 네트워크모델인 CONTAMW를 통해 분석하고자 한다.

[†]E-mail: lch1971@hanmail.net

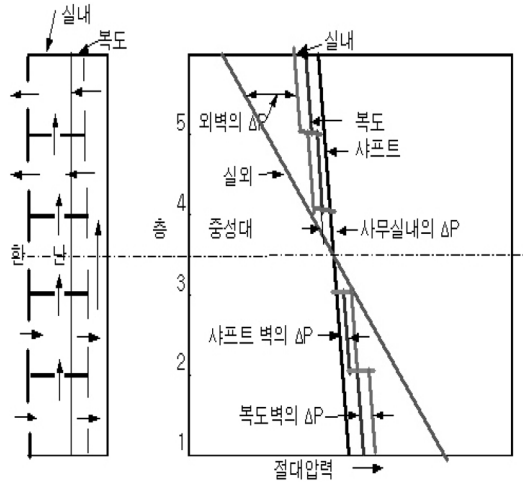


Figure 1. Pressure differences during normal stack effect.

2. 이론적 배경

2.1 연돌효과

연돌효과는 Figure 1과 같이 건축물 내·외부의 온도차로 인하여 부력이 발생하여 공기가 건축물 수직방향으로 유동하는 현상을 말하며, 건축물의 기밀도, 건축물의 개구조건, 건축물 내·외부 간의 온도차 등에 영향을 받는다.

여기서, 초고층 건축물의 경우 건물높이가 매우 높기 때문에 연돌효과에 의한 차압이 상대적으로 크게 발생한다. 연돌효과로 인해 발생하는 차압은 일반적으로 식(1)과 같이 나타낸다.³⁾

$$\Delta P_{SO} = K_S \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_S} \right) H \quad (1)$$

단, ΔP_{SO} : 연돌효과에 의한 차압(Pa)

K_S : 계수(3,460)

T_0 : 외부공기의 절대온도(K)

T_S : 내부공기(샤프트)의 절대온도(K)

H : 중성대로부터 높이(m)

2.2 풍압효과

바람이 불면 건물주위에 복잡한 기류가 발생하여 건물 표면을 따라서 다양한 풍압분포를 발생시키는데 이를 풍압효과(wind effect)라고 한다.

바람은 건물의 높이, 형상 및 지형 등에 따라 변화를 가진다. 바람이 불어오는 방향의 건물면의 압력은 양압(positive pressure)을 가지고 반대면의 압력은 부압(negative pressure)을 가진다. 이것을 압력계수라고 하

며 바람의 방향과 건물면의 위치에 따라 다르다.

바람이 건물에 미치는 차압은 식(2)와 같이 풍속의 제곱에 비례한다.⁴⁾

$$\Delta P_W = \frac{1}{2} C_W \rho_o V_H^2 \quad (2)$$

단, ΔP_W : 표면에 미치는 풍압(Pa)

C_W : 압력계수

ρ_o : 외기밀도(Kg/m³)

V_H : 높이 H에서의 풍속(m/s)

바람은 지면에서 높아질수록 증가한다. 일정높이 이상이 되면 일정해지는데 이를 gradient wind라고 한다. 경계층 내의 유동은 지표면의 불균형성과 건물, 나무 등의 장애물에 영향을 받으므로 풍속과 높이간의 관계는 식(3)과 같이 지수법칙으로 나타낸다.^{5,6)}

$$V_H = V_o A \left(\frac{H}{H_o} \right)^B \quad (3)$$

단, V_H : 높이 H에서의 풍속(m/s)

V_o : 관측소에서 측정된 풍속(m/s)

H : 구하고자하는 높이(m)

H_o : 관측소에서 측정된 지점의 높이(m)

A, B : 지형계수

2.3 화재실 온도의 영향

화재실 온도는 개방된 개구부를 통한 질량유동에 영향을 미친다. 배연창을 통한 질량유동율은 오리피스방정식에 따라 식(4)와 같이 나타낸다.⁶⁾

$$m = CA \sqrt{2\rho \Delta P} \quad (4)$$

단, m : 질량유동율(kg/s)

C : 유동계수

A : 유동면적(m²)

ρ : 유동경로 상의 가스밀도(kg/m³)

ΔP : 유동경로 상의 차압(Pa)

3. 모델링 해석

3.1 분석도구

분석도구는 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발되어 연돌효과 및 연기유동에 관한 많은 연구(Joetal., 2007; Khoukhal., 2006; Jacques, 1996; Lovatt and Wilson, 1994)에 사용되고 검증된 네트워크 모델인 CONTAM 2.4b를 사용하였으며, 본 프

로그를 활용에 대한 제반 사항은 해당 매뉴얼을 따르도록 하였다.⁷⁾

3.2 분석대상

분석대상 건축물은 Figure 2에서와 같이 중앙코어방식의 업무시설로 중앙에 두 대의 승강기와 특별피난계단 및 부속실이 있고, 복도를 거쳐 측면으로 사무실 6개가 둘러싼 구조로서 단순화 하였다. 층고는 4.2 m, 지상 50층 규모의 초고층 건축물로 계획하였으며, CONTAMW를 통해 Figure 3과 같이 모델링 하였다. 여기서, 평면의 \blacksquare , \circ 는 구역의 정의 및 특성을 나타내고 외벽에서 \circ 는 누설틈새의 비, \odot 는 배연창, 내벽에서의 \circ 는 출입문을 나타낸다.

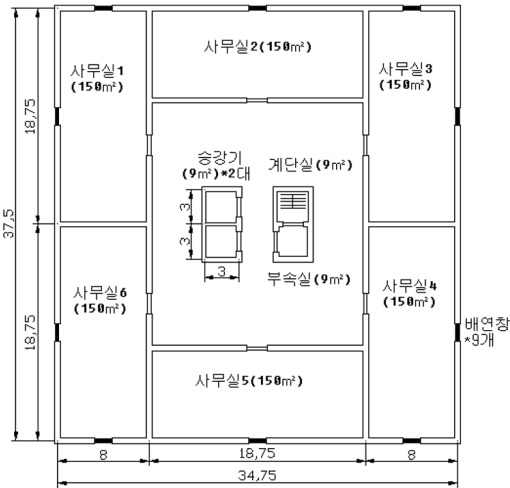


Figure 2. Configuration of the building space.

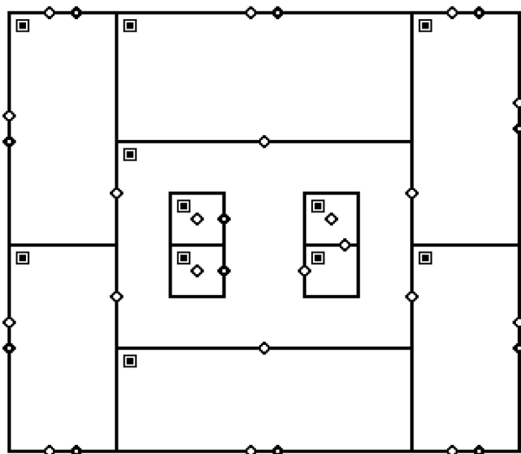


Figure 3. Schematic diagram of multi-zone model.

Table 1. Air leakage data for door

Type of door	Size (m)	Leakage area (m ²)
Single-leaf opening in to a pressurized space	0.9×2.1	0.01
Single-leaf opening outwards from a pressurized space	0.9×2.1	0.02
Lift landing door	2.0×2.0	0.06

Table 2. Air leakage data for walls

Construction element	Wall tightness	Leakage area ratio (A _{LW} /A _{Wall})
Exterior building walls	Tight	0.7×10 ⁻⁴
	Average	0.21×10 ⁻³
	Loose	0.42×10 ⁻³
	Very loose	0.13×10 ⁻²

문의 누설틈새 면적은 Table 1과 같다. Table 2는 콘크리트 외벽의 누설틈새 비를 나타낸 것으로 A_{LW}는 벽의 누설면적, A_{Wall}는 벽의 면적을 말한다.⁸⁾

배연창의 유효면적은 관련 규정에 따라 바닥면적의 100분의 1이상을 적용하여 1.5 m²(1.5 m×1 m)로 설정하였으며, 2방위로 배치된 사무실은 1.0 m²(1.5×0.67 m, 최소규정)씩 2개로 분리하여 배치하였다. 설치높이는 연기의 원활한 배출을 위해 바닥으로부터 3 m의 위치에 배치하였다.⁹⁾

3.3 화재시나리오 및 해석조건

3.3.1 화재시나리오

화재시나리오는 중성대(Neutral plane) 이하 및 중성대 이상으로 구분하여 화재조건을 부여하였으며 중성대 이하는 3층, 중성대 이상은 47층을 화재층으로 지정하였다.

화재층 중 화재실은 외기풍압을 가장 크게 받는 북측 사무실2의 온도를 200°C와 400°C, 외기풍속은 2.8 m/s와 7 m/s로 각각 구분하여 지정하였다.

연돌효과의 분석은 수직샤프트 중 외부변화에 영향을 가장 적게 받는 엘리베이터샤프트를 기준으로 분석하였다.

화재시에는 화재층 전체 배연창 및 화재층의 출입문, 부속실문, 계단실문과 1층 부속실문, 계단실문이 동시에 개방되는 조건으로 모델링하였다.

3.3.2 해석조건

날씨는 정상상태로, 외부온도는 연돌효과가 가장 크

Table 3. Terrain coefficient and exponent

Class	I (None)	II (Light)	III (Moderate)	IV (Heavy)	V (Very Heavy)
A	1.30	1.00	0.85	0.67	0.47
B	0.10	0.15	0.20	0.25	0.35

Table 4. Wind pressure coefficient (C_w)

Plane	A	B	C	D
Wind ⇒ A □ B C D	+0.8	-0.25	-0.8	-0.8

계 발생하는 겨울철 서울지역 TAC 2.5를 적용하여 외기온도 -11.3°C , 사무실 온도는 실내 난방 적정온도인 22°C , 복도 10°C , 승강로 및 계단실, 부속실은 5°C 를 적용하였다.¹⁰⁾

외기풍속은 겨울철 서울지역 난방설계용 외기조건 평균풍속 2.8 m/s와 강한 바람이 부는 조건 7 m/s, 풍향은 북풍으로 설정하였다.

지형계수는 Table 3의 복잡한 도심지역에 해당하는 등급 IV(Heavy)를 적용하였으며, 건축물 외벽의 압력 계수는 Table 4와 같이 벽면 전체적으로 평균화된 압력값인 Macdonald 계수를 적용하였다.¹¹⁾

화재조건은 사무실 온도설정으로 구분하였으며, 비화재조건은 평상시 사무실 온도 22°C , 화재조건은 성장기화재 중 초기온도 200°C 와 중기온도 400°C 로 구분하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 비화재시 연돌효과

비화재시 건물기밀도에 따른 연돌효과는 바람의 영향을 고려하지 않을 경우(무풍조건) Figure 4와 같이 모든 조건(Tight, Average, Loose)에서 중성대는 26층에 형성되었고 최대차압은 159.4 Pa로 나타났다.

이는, 연돌효과에 의한 차압은 실·내외 온도차와 높이에 따라 결정되므로 건물기밀도와는 무관하게 일정하게 나타났으며, 중성대의 형성은 바람의 영향을 무시할 경우 건축물 내·외부간의 기류흐름이 적어 연돌효과에 미치는 영향도 미미하게 나타난 것으로 판단된다. 비화재시 건물 기밀도성이 높은 조건(Tight)에서 바람의 영향을 고려 할 경우 Figure 5와 같이 외기풍속 2.8 m/s에서는 27층에 형성되었던 중성대가 풍속 7 m/s에서는 31층으로 상향이동되었다.

이러한 중성대의 이동현상은 바람의 영향에 의해 유입된 기류가 수직샤프트의 연돌효과와 함께 상승 작용

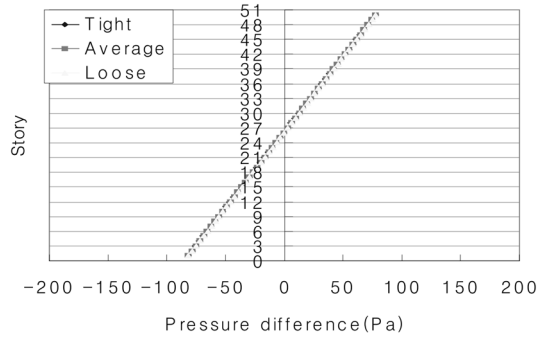


Figure 4. Stack effect in the elevator shaft depending on various wall tightness with closed smoke ventilators at no wind.

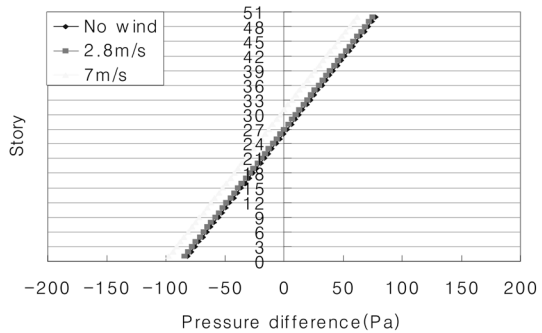


Figure 5. Stack effect in the elevator shaft depending on various wind velocities with closed smoke ventilators at wall tight.

하여 중성대를 상향 이동시키는 것으로 판단된다.

1층을 기준으로 외기풍속 7 m/s 조건과 무풍조건과는 15.4 Pa의 압력 차이를 보이고, 이 압력차이는 저층부의 외기를 유입하는 힘이 되어 중성대를 상향 이동시키므로 외기가 유입되는 수직구역의 범위가 확대 되는 것으로 판단된다.

4.2 화재시 연돌효과

화재실 온도 및 외기풍속에 따라 중성대 이하층인 3층 및 중성대 이상층인 47층의 배연창을 개방할 경우 나타나는 연돌효과는 Figure 6, Figure 7과 같다.

먼저, 배연창 개방이 연돌효과에 미치는 영향을 분석하면, 비화재시 바람의 영향을 고려하지 않을 경우

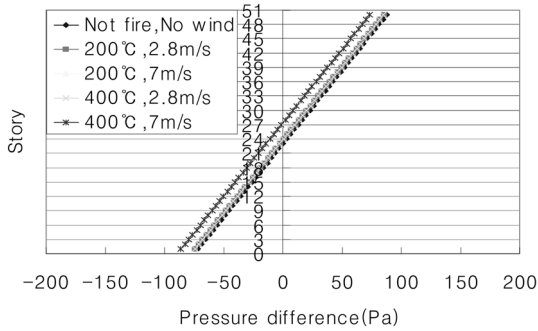


Figure 6. Stack effect in the elevator shaft depending on various fire room temperatures and wind velocities at open smoke ventilators on the 3rd story.

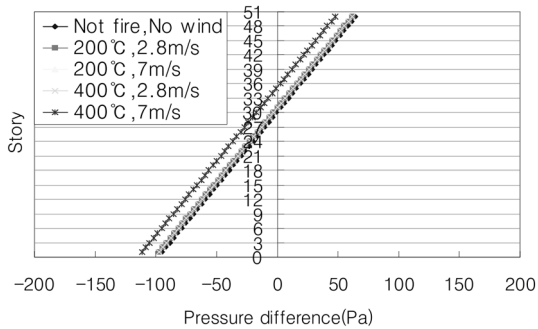


Figure 7. Stack effect in the elevator shaft depending on various fire room temperatures and wind velocities at open smoke ventilators on the 47th story.

(배연창이 닫혀 있는 경우) 26층에 형성되었던 중성대가 3층 배연창의 개방으로 23층으로 하향 이동되었고, 47층 배연창의 개방은 30층으로 중성대가 상향 이동되었다.

이러한 중성대의 이동현상은 배연창의 개방으로 인해 개방층의 압력이 대기압과 가까워지므로 샤프트의 중성대도 개방층 방향으로 이동하는 것으로 판단된다.

둘째, 바람의 영향이 연돌효과에 미치는 영향을 분석(배연창이 개방된 경우)하면, 3층은 비화재시 바람의 영향을 고려하지 않을 경우 23층에 형성되었던 중성대가 외기풍속 2.8 m/s에서는 24층, 7 m/s에서는 27층으로 중성대가 상향 이동되었고, 47층은 같은 조건에서 30층에 형성되었던 중성대가 외기풍속 2.8 m/s에서는 31층, 7 m/s에서는 35층으로 중성대가 상향 이동되었다.

이러한 중성대의 이동현상은 바람의 영향에 의해 유입된 기류가 수직샤프트의 연돌효과와 함께 상승 작용하여 중성대를 상향 이동시키는 요인이 되는 것으로 판단된다.

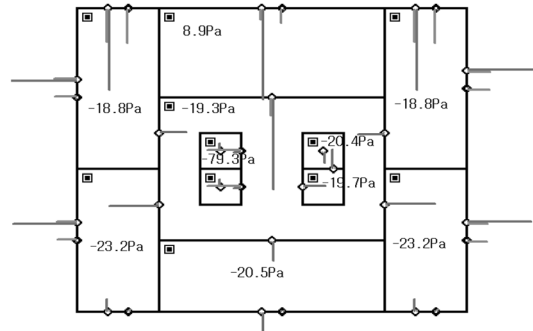


Figure 8. Pressure distribution depending on fire room temperature 400°C and wind velocity 7m/s at open smoke ventilators on the 3rd story.

셋째, 화재실 온도변화가 연돌효과에 미치는 영향을 분석하면, 화재실내의 온도변화는 화재층에서의 기류 흐름에는 영향이 있었으나, 연돌효과에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

Figure 8은 화재실 온도 400°C, 외기풍속 7 m/s에서 3층 배연창이 개방된 경우 압력분포 및 기류흐름을 나타낸 그림이다. 여기서, 수직샤프트인 엘리베이터샤프트의 압력이 -79.3 Pa인데 비해 계단실의 압력은 -20.4 Pa로 상대적으로 높은 이유는 엘리베이터샤프트는 모두 닫혀 있고 누설틈새만 존재하지만 계단실은 화재시 나리오에 의해 화재층 부속실 및 계단실문과 1층 계단실문이 개방된 조건으로 모델링 되었으므로, 계단실의 중성대가 개방층에 가깝게 큰 폭으로 하향 이동된 것으로 판단된다. 여기서 계단실에서의 기류방향이 연돌효과에 의해 상승하지 않고 하강하는 이유는 계단실로 유입된 기류가 개방된 1층 계단실문 쪽으로의 흐름이 형성되는 것으로 판단된다. 그러나 계단실 전체의 압력은 연돌효과에 의한 Figure 10과 같이 선형적인 증가를 보이고 있다.

이러한 연돌효과에 의해 계단실의 중성대는 9층에 형성되어 중성대 이상층은 중성대 이하층에서 유입된 연기가 확산될 우려가 있으며, 최상층에 형성된 최대 압력은 131.5 Pa로 피난문 개방 장애 등의 우려가 있는 것으로 판단된다.

Figure 9는 동일한 조건에서 47층 배연창이 개방된 경우 압력분포 및 기류흐름을 나타낸 그림이다. 여기서, 수직샤프트인 엘리베이터샤프트의 압력이 38 Pa이고, 계단실의 압력은 -13 Pa로 상대적으로 낮는데, 이 또한 계단실의 중성대가 개방층에 가깝게 큰 폭으로 상향 이동된 것으로 판단된다. 이 경우 중성대는 옥탑층에 형성되어 전 층에서 외기가 유입되는 것으로 나

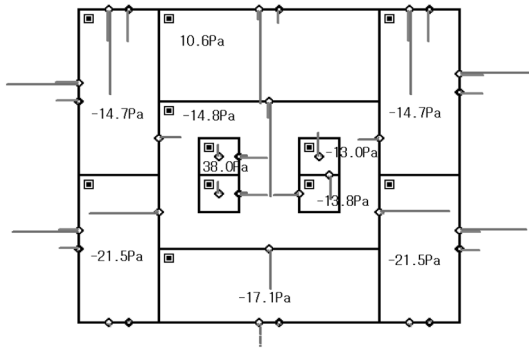


Figure 9. Pressure distribution depending on fire room temperature 400°C and wind velocity 7 m/s at open smoke ventilators on the 47th story.

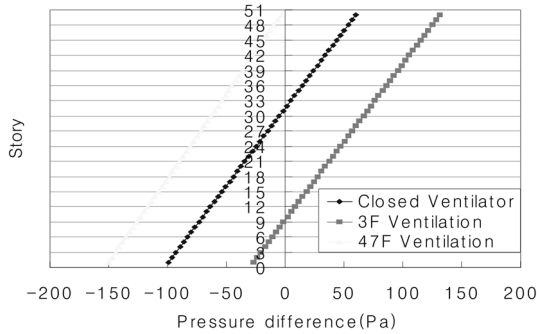


Figure 10. Stack effect in the stairwell depending on fire room temperature 400°C and wind velocity 7 m/s.

타났으며, 최하층에 형성된 최대압력은 150.3 Pa로 개방된 계단실문은 유입되는 기류흐름에 의해 닫혀 지지 않을 우려가 있는 것으로 판단된다.

Figure 10은 화재실 온도 400°C, 외기풍속 7 m/s 조건에서 배연창 개방에 따른 계단실의 압력분포를 나타낸 그래프이다.

4.3 화재실의 배연특성

배연창 개방에 따른 화재실의 온도 및 외기풍속별 배연특성을 분석하면 Figure 11, Figure 12와 같다.

바람의 영향을 고려하지 않는 화재조건에서는 3층 및 47층 모두 화재실의 부력 및 팽창으로 실내공기가 배출되는 정상적으로 배연성능을 보였으나, 바람의 영향을 고려할 경우의 배연특성은 화재실의 온도 및 외기풍속에 따라 변화하는 것으로 나타났다.

3층은 외기풍속 2.8 m/s 조건에서 화재실온도가 200°C 인 경우 화재실의 부력 및 팽창보다 바람의 영향이 크게 작용하여 외기가 유입되었으나, 화재실온도가 400°C

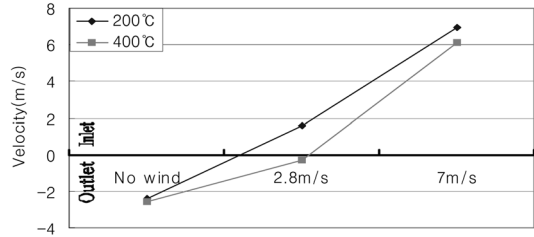


Figure 11. Ventilation velocities depending on various fire room temperatures and wind velocities at open smoke ventilators on the 3rd story.

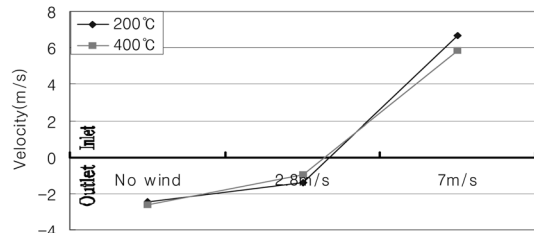


Figure 12. Ventilation velocities depending on various fire room temperatures and wind velocities at open smoke ventilators on the 47th story.

로 상승할 경우에는 실내공기가 배출되는 배연성능을 보였다.

그러나 외기풍속 7 m/s 조건에서는 화재실의 부력 및 팽창보다 바람의 영향이 크게 작용하여 외기가 빠르게 실내로 유입되는 성능을 보였다.

47층은 외기풍속 2.8 m/s 조건에서 고층부의 연돌효과가 작용하여 3층 배연창 개방 시보다 배출능력이 뛰어나, 화재실온도 200°C, 400°C 모두 실내공기를 배출하는 배연성능을 보였다.

외기풍속 7 m/s 조건에서는 3층과 마찬가지로 바람의 영향이 크게 작용하여 외기가 빠르게 실내로 유입되는 성능을 보였다.

Figure 13, Figure 14는 배연창 개방에 따른 화재실 온도 및 외기풍속별 기류흐름을 나타낸 그림으로서 조건별 외기유입 및 실내공기의 배출을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구 결과 초고층건축물에서의 연돌효과는 배연창 개방 및 외기풍속이 중성대의 위치형성에 중요한 영향을 주는 것으로 분석되었다.

1) 배연창 개방이 연돌효과에 미치는 영향은 개방된 배연창 층이 대기압에 가까워지므로 연돌효과의 중성

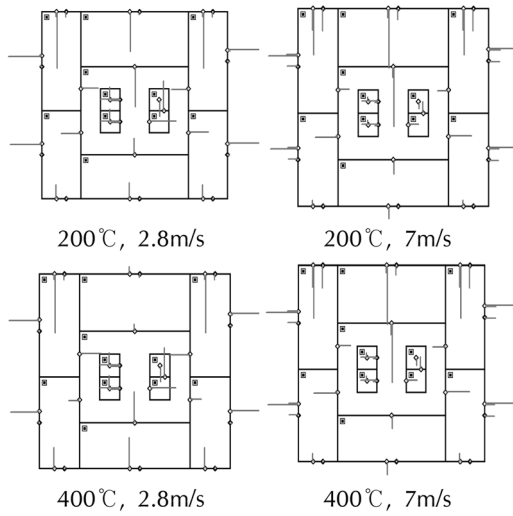


Figure 13. Air flow depending on various fire room temperatures and wind velocities at open smoke ventilators on the 3rd story.

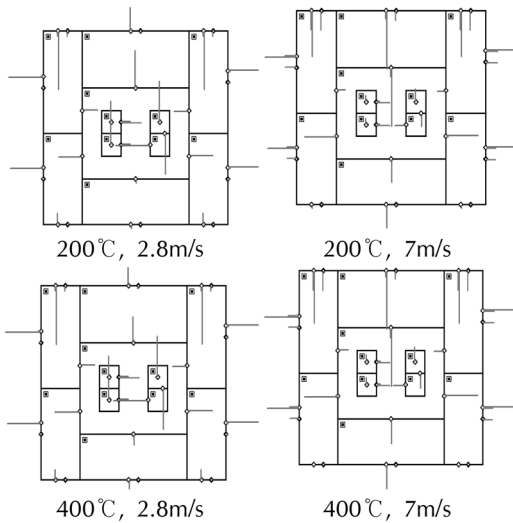


Figure 14. Air flow depending on various fire room temperatures and wind velocities at open smoke ventilators on the 47th story.

대도 개방층 쪽으로 이동하는 것으로 나타났으며, 샤프트의 누설틈새나 개구면적이 클수록 중성대 이동은 개방층에 가까워지는 것으로 분석되었다.

2) 바람의 영향이 연돌효과에 미치는 영향은 외기풍압에 의해 건물 내로 유입된 기류는 수직샤프트의 연돌효과와 함께 상승 작용하여 중성대를 상향 이동시키는 것으로 나타났으며, 외기풍속이 빠를수록 중성대의 상향이동은 커지는 것으로 분석되었다.

3) 배연창 개방에 따른 화재실 온도 및 외기풍속별 배연특성은 화재조건에서 바람의 영향을 고려하지 않을 경우 화재실의 부력 및 팽창으로 실내공기가 배출되는 정상적으로 배연성을 보였다, 바람의 영향을 고려할 경우 외기풍속이 강할수록 화재실의 부력 및 팽창보다 바람의 영향이 크게 작용하여 외기가 유입되는 비정상적인 배연성을 보였다. 이러한 현상은 화재발생시 생성된 연소가스가 배연창을 통해 배출되지 않고 건물 내 수직샤프트를 통해 상층부로 확산되는 결과를 초래하므로 높이에 따라 증가하는 풍속과 풍속의 제곱에 비례하는 풍압을 받는 초고층 건축물에서의 제연설계에 있어서는 좀 더 체계적인 연구와 함께 바람의 영향을 고려한 성능위주의설계가 적용되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김진수, “초고층 건물에 나타나는 연돌효과”, 한국화재소방학회지, 제3권 1호, pp.14-20(2007).
2. 윤아영, “초고층 빌딩의 최적 방재시설 설계방안에 관한 연구”, 한국소방학회지, 제3권 1호, pp.8-13(2007).
3. G. T. Tamura, “Smoke Movement & Control In High-rise Building”, NFPA(1994).
4. John H. Klotz & James. A. Mike, “Principles of Smoke Management”, ASHRAE(2002).
5. ASHRAE, “ASHRAE Handbook Fundamentals Ch.26 Ventilation and Infiltration”, ASHRAE(2001).
6. John H. Klotz, “Design of Smoke Control System for Elevator Fire Evacuation Including Wind Effects”, Proceedings, 2nd symposium, ASME, pp.59-77(1995).
7. Walton, G. N, CONTAMW 2.4b User Guide and Program Documentation, NISTIR 7251, NIST(2006).
8. EN 12101-6, Smoke and Heat Control Systems(2005).
9. 국토해양부, 건축물의 설비기준 등에 관한규칙 제 14 조(2008.7.10.).
10. 건설교통부고시 제2008-5호.
11. Macdonald, A. J., Wind Loading on Buildings, NewYork, Wiley(1975).