

화재 시 고층건축물의 연돌효과에 따른 압력차 분석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Pressure Difference According to the Stack Effect of High-Rise Buildings during Fire

김혜원* · 구인혁** · 김윤성*** · 이병흔**** · 진승현***** · 권영진*****
Kim, HyeWon* , Koo, InHyuk** , Kim, YunSeong*** , Lee, ByeongHeun**** ,
Jin, SeungHyeon***** , and Kwon, YoungJin*****

Abstract

As the number of high-rise buildings in Korea continues to increase, interest in the stack effect is increasing. In particular, in the event of a fire, as the indoor temperature increases, there is the problem that the stack effect increases. Accordingly, it is necessary to analyze the stack effect resulting from temperature change during a fire. In this study, by using CONTAMW simulation, the opening was opened or closed. In the case where the temperature of the fire room rises to the temperature of the growth period caused by a fire, the pressure difference in the building according to the temperature increase during a fire was confirmed. As a result, depending on whether the opening was opened or closed, the pressure difference was uniform for each layer, ranging from 0 to 100 Pa when opened. However, assuming a fire room, the pressure in the fire layer increased to approximately 250 Pa, and it was confirmed that the pressure difference varied greatly for each floor.

Key words : Stack Effect, Smoke Behavior, Smoke Control, ContamW Simulation

요 지

국내의 고층건축물이 지속적으로 증가되어 감에 따라 연돌효과와 관련한 관심이 대두되고 있다. 특히 화재 시에는 실내의 온도가 높아지면서 연돌효과가 커지는 문제가 발생하고 있다. 이에 따라 화재 시 온도변화에 따른 연돌효과의 영향을 분석해야 할 필요가 있다고 판단된다. 본 연구에서는 CONTAMW시뮬레이션을 이용하여 개구부의 개폐여부와 화재가 발생하여 화재실의 온도가 성장기의 온도로 상승한 경우를 설정하여 화재 시 온도상승에 따른 건축물 내의 압력차를 확인하였다. 그 결과 개구부의 개폐여부에 따라서는 개방 시에는 0~100 Pa 정도로 각 층마다 균일한 압력차를 보였다. 하지만 화재실을 가정하였을 때는 화재층의 압력이 250 Pa 정도로 높아지며, 각 층마다 압력차의 변동이 큰 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 연돌효과, 연기유동, 연기제어, ContamW 시뮬레이션

1. 서 론

현재에 이르기까지 고층건축물은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 고층건축물은 화재안전에 있어 다양한 문제를 가지고 있지만, 이 중 화재 시 고온연기와 차가운 공기의

난류 혼합운동에 의해 발생하는 연돌효과에 의해 연기가 상층부로 빠르게 확산되어 건축물 내의 재실자의 피난에 문제가 발생함에 따라 다수의 인명피해가 발생하는 것이 가장 큰 문제로 제기되고 있다.

이에 국내에서는 화재연기확산 및 연돌효과를 방지하기

*정회원, 호서대학교 산학협력단 연구원(E-mail: koww115@naver.com)

Member, Researcher, Industry Academy Cooperation Foundation of Hoseo University

**정회원, 호서대학교 산학협력단 연구원

Member, Researcher, Industry Academy Cooperation Foundation of Hoseo University

***정회원, 호서대학교 소방방재학과 석사과정

Member, Master's Course, Department of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo University

****정회원, 호서대학교 소방방재학과 박사과정

Member, Ph.D. Candidate, Department of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo University

*****정회원, 호서대학교 소방방재학과 박사과정

Member, Ph.D. Candidate, Department of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo University

*****교신저자, 정회원, 호서대학교 소방방재학과 교수, 공학박사(Tel: +82-41-540-5497, Fax: +82-41-540-5738, E-mail: jungangman@naver.com)

Corresponding Author, Member, Professor, Ph.D., Department of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo University

위해 화재안전기준인 NFSC501과 NFSC501A의 연기제어 설비 관련 법령을 규정하고 있다. 하지만 연돌효과 등 화재로 인한 다양한 변수를 고려하지 않고 최대 배출량 및 누설틈새면적만을 고려하고 있어 실제 화재 시 급기량 부족, 과압으로 인한 출입문 폐쇄장애 등 다양한 문제가 발생하고 있다(Jang, 2019). 반면 인용된 법령인 미국의 인명안전코드인 NFPA 92 (2012)의 경우 누설틈새 면적을 통한 급기량의 산정방식은 유사하지만, 배연구와 같은 설계에 있어 화재이론을 기반으로 설계를 하고 있는 차이가 나타나고 있다. 따라서 국내의 경우에도 이를 고려한 연구가 필요한 실정이다.

이에 국내 연구동향을 살펴보면, 건물의 기밀성능에 따른 압력을 실측하여 연돌효과를 평가하는 연구(Lim et al., 2009), 초고층 건축물에서 개구부의 개폐상태에 따른 연돌효과와 기류 흐름을 실측하여 저감대책을 나타내는 연구(Seo et al., 2010), 배연창과 외기풍속이 연돌효과에 미치는 영향을 분석하고 화재층 연기배출과 관련된 압력과 기류 특성을 CONTAMW 시뮬레이션을 통해 분석한 연구(Lim et al., 2008) 등의 초고층건축물에서의 연돌효과에 관하여 현장 실측이나 시뮬레이션을 통한 외기풍속 및 개구부의 영향을 검토하는 연구가 진행되고 있다. 반면 국외의 기존연구를 살펴보면 Klote and Tamura (1986)는 화재 시 연돌효과 및 연기성상은 온도분포에 영향을 받는 것을 연구를 통해 나타내었으며, Peppes et al. (2002)은 계단과 건물사이의 질량유량 및 온도의 흐름을 측정하여 속도를 예측하는 공식을 제안하는 연구를 실시하고, Shi et al. (2014)은 화재크기에 따라 계단의 수직 온도분포가 다르게 나타나고 이에 따라 연기의 성상이 변화하며 엔지니어는 이를 고려하여 시스템을 설계해야 할 필요성에 대하여 제시하는 연구 등의 실험적인 연구가 진행되었다. 2019년 5월에 개최된 제연설비 관련 토론회에서는 제연설비 설계 시에는 화재에 대한 다양한 변수를 고려한 설계의 필요성에 대해 제시되었다. 하지만 국내의 연기제어 관련 연구동향에서는 화재의 기초이론에 따른 연기제어 설계에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국외 등 연기제어 설계 시규정하고 있는 연돌효과와 관련한 기초이론을 분석하여 기준분석을 통해 현재 기준에서 고려하고 있는 사항을 해외와 비교하며, CONTAMW시뮬레이션을 통해 화재의 크기가 연돌효과에 미치는 영향에 대해 비교분석하여 화재 시 연돌효과 및 연기제어 설계를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 연돌효과 관련 이론적 고찰

일반적으로 평균 실내 온도가 실외 온도보다 높으면 계단 및 엘리베이터 샤프트와 같은 건물 내 수직 공간의 경우 상향으로 유동이 발생한다. 이러한 유동을 분석하기 위해서는 중성대의 위치를 분석하고, 이를 통한 연돌효과의 흐름을

평가하는 것이 중요한 요소이다. 일반적인 연돌효과와 관련한 공식은 온도가 공간 전체에 걸쳐 균일하다는 가정하에 Klote 모델을 사용하여 중성대를 계산하고, 외부와 내부의 온도차이에 의해 발생하는 압력차를 분석하고 있다(Klote, 1991). 하지만 Klote 모델은 상수가정을 하는 것이 단점으로써 공기의 혼입과 화재의 크기로 인해 중성대의 위치가 변경될 수 있으며 이에 따라 중성대의 위치에 대한 상세한 연구가 필요한 실정이다. 국외의 경우에는 이를 고려하여 2존모델을 통해 나타난 수학적 모델을 사용하고 있다.

2.1 중성대 및 연돌효과에 대한 일반적인 수학적 모델(Klote 모델) (Klote, 1989)

Klote 모델의 경우 공간에서 바닥까지 일정한 폭을 갖는 연속적인 개구부를 모델로써의 일반적인 기류패턴으로 분석하도록 되어있다. 일반적인 경우에 중성대의 높이와 천장 높이의 비율을 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$H_n/H_c = 1/[1 + (T_c/T_\infty)^{1/3}] \quad (1)$$

H_n 은 공간의 중성대 높이[m], H_c 는 공간의 총 높이[m], T_c 는 샤프트 공간의 온도[K], T_∞ 는 외기의 온도[K]이다.

이와 같은 식의 설명을 위해 간단한 그림으로 표현하면 Fig. 1과 같이 나타난다. Fig. 1에서 수평화살표는 공기의 이동방향, 빨간색으로 나타낸 영역은 화재가 발생한 구역을 의미한다.

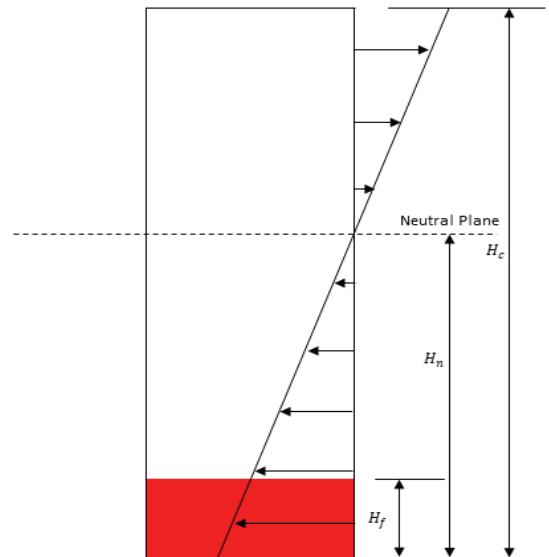


Fig. 1. General Stack Effect in Fire (Klote Model)

또한 Klote 모델에서는 중성대 높이를 결정한 후 이를 통해 내부와 외부의 압력차를 구할 수 있는 공식을 제시하고 있다. 이에 대한 식은 Eq. (2)와 같이 나타난다.

$$\Delta P_{fo} = \frac{gP_{atm}}{R} \left[\frac{1}{T_{\infty}} - \frac{1}{T_f} \right] h \quad (2)$$

여기서, ΔP_{fo} 는 화재실과 외부의 압력차[Pa], R은 기체 상수[J/kg·K], T_{∞} 는 외기의 온도[K], T_f 는 화재실의 온도 [K]을 의미한다.

이와 같이 일반적인 연돌효과의 흐름을 확인하였을 때, 건축물 내부의 온도 값을 통해 건축물의 중성대를 파악하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

2.2 환기제어 및 연료지배의 영역을 고려한 중성대 및 연돌효과에 대한 2구역 존모델(Zhang et al., 2008)

일반적인 연돌효과의 흐름을 분석하는 모델인 Klote 모델의 경우 중성대 아래의 공기의 유입이 차가운 공기로서 화재가 없는 상태에 적합할 것으로 판단되고 있다. 이에 국외의 Zhang et al. (2008)은 화재 시 공기공급에 따른 2구역 존모델의 이론식을 도출한 바 있다. 이 모델은 현장모델의 검증을 통해 Klote 모델의 값에 연료지배와 환기지배를 고려한 수식을 대입하여 도출한 것으로서, 연소특성의 차이를 분석한 후 이를 식에 대입하고, 실제 현장검증을 실시하였다. 먼저 본 모델에서는 Harmathy (1972)의 화재 임계영역을 결정하기 위한 방정식인 Eq. (3)을 이용하였다.

$$\frac{\rho_a g^{1/2} A_w \sqrt{h}}{A_{fuel}} = 0.263 \quad (3)$$

ρ_a 는 공기의 밀도(kg/m³), g는 중력가속도(m/s²), A_w 는 창 면적(m²), h는 창 높이(m), A_{fuel} 는 연료층의 표면적(m²)이다.

Eq. (3)에서 사용되는 A_{fuel} 는 일반적으로 Eq. (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$A_{fuel} = nG_0 \quad (4)$$

G_0 는 등가목재의 총 화재하중(kg), n은 연료의 표면적 비율(m²/kg)으로 표현할 수 있다.

이와 같이 연료와 환기인자의 조건을 분석하고, 논문에서의 이론식은 이를 이용하여 환기조건이 다른 2구역모델을 만들고자 하였으며 이에 따른 제시 식은 Eqs. (5)-(7)과 같이 나타났다.

$$m'_i = \frac{2}{3} K_o CW H_f^{3/2} \sqrt{2\rho_{\infty} g K_p (\rho_{\infty} - \rho'_f)} \quad (5)$$

K_o 는 보정계수[-], C는 해당 구획실의 비열[J/kg·K], W'는 개구부의 너비[m], H_f 는 개구부의 높이[m], ρ_{∞} 는 외기

밀도, ρ'_f 는 화재실의 밀도이다.

$$m_i = \frac{2}{3} K_o CW H_f^{3/2} \sqrt{2\rho_{\infty} g K_p (\rho_{\infty} - \rho'_f)} + \frac{2}{3} K_o CW (H_n - H_f)^{3/2} \sqrt{T_c/T_{\infty}} \quad (6)$$

H_n 는 중성대의 높이, H_f 는 화재영역의 높이, T_{∞} 는 외기의 온도[K], T_c 는 화재실의 온도[K]을 의미한다.

$$\frac{(H_c - H_n)^{3/2}}{\sqrt{(T_f - T_{\infty})/(T_{\infty} T_f (T_c - T_{\infty}) + H_c - H_n)^{3/2} \sqrt{T_c/T_{\infty}}}} = (W'/W) (H_f)^{3/2} T_c \quad (7)$$

또한, 이를 요약하여 내부와 외부의 압력차를 간략히 한 것은 Eq. (8)과 같이 나타난다.

$$\Delta P_{fo} = K_p g h [\rho_{\infty} - \rho_c] \quad (8)$$

ΔP_{fo} 는 화재실과 외부의 압력차[Pa], K_p 는 보정계수[-], ρ_{∞} 는 외기 밀도, ρ_c 는 화재실의 밀도이다.

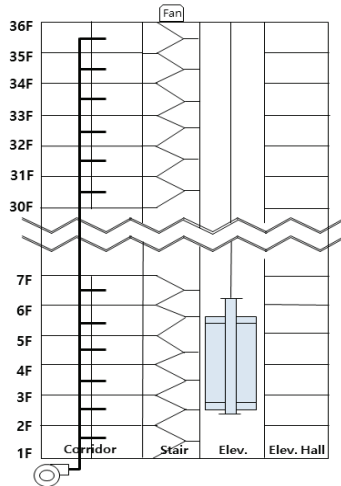
위와 같이 두가지의 모델의 차이점을 분석하면, Klote 모델의 경우 일반적인 연돌효과에 대한 모델로서, 기본적인 연돌효과에 대한 기본적인 식을 제시하고 있다. 2구역 존모델의 경우에는 기존의 Klote 모델에 Harmathy (1972)의 화재 임계영역에 따른 환기지배와 연료지배 등의 요소를 분석하였고 압력차를 구할 때, 각 공간의 밀도에 따른 식을 제시하였다. 각각의 모델은 분석한 결과에 따라 위에서 나타난 바와 같이 차이점을 나타내고 있다. 하지만 두가지 모델의 공통점은 화재 시에 연돌효과의 경우 화재실에서 나타나는 온도에 영향을 받으며, 이러한 온도의 영향을 분석하는 것이 필요한 요소로서 나타났다.

3. CONTAMW를 이용한 수직공간의 압력차 분석

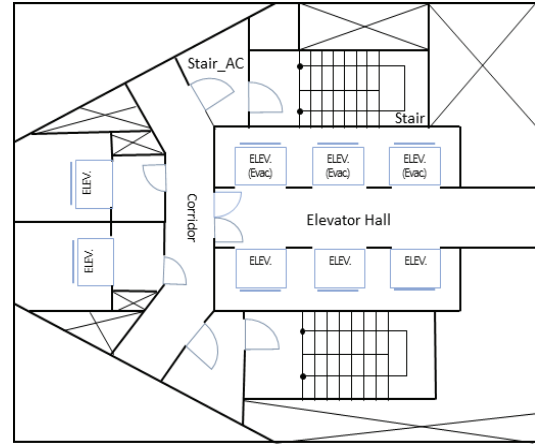
본 연구에서는 위의 이론적 고찰에서 나타난 바와 같이 화재가 발생하여 실내의 온도가 상승하기 시작하면 발생하는 압력차의 변화를 분석하기 위해 시뮬레이션 구동하였다. 시뮬레이션을 구동할 때의 Case 설정은 일반적인 상황에서 배연창 개폐여부, 화재 시 배연창 개폐를 변수로 하였고 이는 화재 시 연돌효과의 분석을 위해 실내 온도의 변화와 압력의 관계를 분석하는 것의 중요함을 나타내고자 하는 것이다.

3.1 CONTAMW 및 건축물 개요

본 연구에서는 건축물의 수직공간 압력차를 확인하기 위해 시뮬레이션을 구동하였다. 시뮬레이션은 현재 연돌효



(a) Building Cross-Sectional Diagram



(b) Building Floor Plan

Fig. 2. Cross-Sectional Diagram and Floor Plan of Target Construction

Table 1. Outline of Target Construction

Division	Contents
Floors	Underground Floors: 4, Ground Floors: 36
Door Area (Fire Door)	1.0 m × 2.2 m (Width × Height)
Elevator door Area	1.0 m × 2.2 m (Width × Height)
Window Area (Smoke Ventilator)	1.0 m × 1.1 m (Width × Height)
Required Airflow	Air leakage Airflow: 0.002119 m ³ /s Add Airflow: 0.048723 m ³ /s
Pressurization Zone	Stairwell lobby Only
Core Type	Central Core (Elev., Evacuation Elev., and Stair are adjacent to each other)

과와 연기유동에 관한 연구를 할 때 많이 사용되고 있는 미국 NIST사의 CONTAMW 시뮬레이션을 사용하였다. 본 시뮬레이션의 대상 건축물은 지하 4층, 지상 36층으로 구성 되어 있다. 또한 본 건축물은 중앙코어 형태의 건축물로서 수직샤프트 공간이 되는 엘리베이터와 계단실이 중앙에 병렬형태로 집중되어 있다. 건축물의 누설량과 외부의 영향을 받을 수 있는 창문은 배연창으로 사용하고 있고, 계단실에 위치하고 있다. 건축물의 수직공간의 경우 중앙에 밀집되어 있는 엘리베이터와 계단실에 의해 상부층으로 연결되어 있기 때문에 수직공간의 압력차 분석을 위해서는 중앙코어의 분석을 중점적으로 실시해야할 필요성이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 제연설비가 설치되어 압력차의 변화 및 연돌효과에 큰 영향을 받을 수 있는 사항을 고려하여 시뮬레이션 구동 시 건축물 구조 중 엘리베이터와 계단실이 있는 중앙코어 부분을 대상으로 하였다. 이에 대한 건축물의

기준층의 평면도와 건축물 전체의 단면도를 나타낸 것은 Fig. 2와 같으며 대상 건축물의 개요는 Table 1과 같다.

3.2 시뮬레이션 조건 값 및 Case 설정

3.2.1 시뮬레이션 기본 값

본 시뮬레이션의 구동 시 설정하는 기본 값은 외피의 기밀도를 나타낼 수 있는 벽의 누설틈새 면적, 층간의 누설량을 설정할 수 있는 바닥 누설틈새면적, 덕트의 마찰계수, 층의 높이가 있다. 층의 높이는 실제 건축물과 같이 3 m로 설정하였으며, 외피의 기밀도를 고려한 벽의 누설틈새 면적은 NFPA 92 (2012)를 인용하여 Average값인 유량계수 0.65에서 $0.17 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 로 하였고, 바닥의 누설틈새면적은 유량계수 0.65에서 0.52×10^{-4} 으로 하였다. 또한 덕트의 크기는 설계 시 사용된 수평덕트와 수직덕트 각각의 사이즈를 입력하였고, 덕트의 재질이나 마찰손실의 값은 ASHRAE Handbook (ASHRAE, 2015)과 SMACNA Fitting part Friction loss (SMACNA, 2019)를 참고하여 값을 대입하였다.

또한 각 공간 사이의 압력차이에 영향을 미치는 공기의 유동경로인 문과 창문과 같은 개구부의 누설면적은 개방 상태인 경우와 폐쇄상태인 경우에 따른 값을 계산하여 대입하였다. 특히 문의 경우에는 방화문인 경우에는 KS F 2846에서 규정된 “차연량 25 Pa 시 $0.9 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$ ”인 것을 이용하여 $Q = 0.827A \sqrt{P}$ 로 계산하여 방화문의 크기가 $1.0 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ 이므로 다음과 같이 누설틈새 면적을 계산할 수 있다.

$$0.9 \frac{\text{m}^3}{\text{min} \cdot \text{m}^2} \frac{\text{min}}{60} 1.0 \text{ m} \times 2.2 \text{ m} = 0.033 \text{ m}^3/\text{s},$$

$0.033 \text{ m}^3/\text{s} = 0.827A \sqrt{25}$, $A = 7.8 \times 10^{-3}$ 으로 나타난다. 여기서 A는 도출된 방화문의 누설틈새 면적[m²]을

의미한다. 또한, 방화문이 아닌 일반 문의 누설틈새면적과 엘리베이터의 문, 창문의 누설틈새면적은 NFPA 92를 인용하여 개방과 폐쇄에 따른 각각의 설정 값을 대입하여 시뮬레이션을 구동하였다. 마지막으로 창문의 누설틈새 면적의 기준산정을 위해서 KS F 2846의 창호의 기밀성능과 법제처에서 규정되어 있는 배연창의 크기 산정기준을 참고하였으며 배연창의 위치는 건축물의 개요에서 나타난 바와 같이 계단실의 외벽 부근에 설정 하였다. 또한 이에 대한 값을 간략히 나타난 것은 Table 2와 같으며, 대상 건축물을 시뮬레이션을 통해 모델링한 것은 Fig. 3과 같다.

Table 2. Fundamental Value of Simulation

Division	Contents		
Flow Area (Wall)	Average		
	(0.65 [-]*, 0.17×10^{-3} [m ²])**)		
Flow Area (Floor)	Average		
	(0.65 [-]*, 0.52×10^{-4} [m ²])**)		
Window	0.49×10^{-3} [m ²]		
Flow Area (Smoke Ventilator)	Calculation the leakage rate according to KS F 2292		
Single Door	Closed	0.023 [m ²]	
Air Leakage Area	Opened	2.0 [m ²]	
Double Door	Closed	0.045 [m ²]	
Air Leakage Area	Opened	3.9 [m ²]	
Elevator Door	Closed	0.06 [m ²]	
Air Leakage Area	Opened	0.56 [m ²]	
Single Fire Door Air Flow Area	Closed	7.98×10^{-3} [m ²]	
	Opened	2.42 [m ²]	
Double Fire Door Flow Area	Calculation the leakage rate according to KS F 2846		
	Closed	15.96×10^{-3} [m ²]	
	Opened	4.84 [m ²]	
Duct	Horizontal	Air intake	Size: 2×0.6 [m ²] (Tee- 0.8×0.65)
		Air outlet	Size: 1.4×0.4 [m ²] (Connection- 0.9×0.6)
	Flow: 21,500 [m ³ /h]		
	Vertical	Size: 1×0.45 [m ²] Air Leakage Rate: 94.40 [l/s]	
SMACNA Fitting part Friction loss (SMACNA, 2019)			
Floor Height	3 m		

* Flow coefficient, ** Flow Area

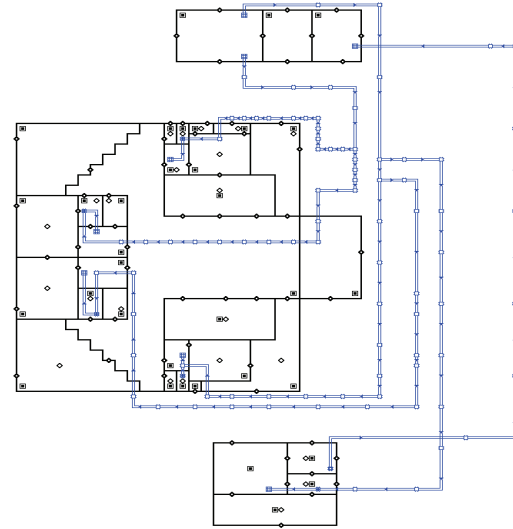


Fig. 3. Modeling of Target Construction by CONTAMW

3.2.2 Case 설정

본 논문의 시뮬레이션 구동 Case는 총 4가지로 설정하였다. 먼저, 첫 번째 조건인 Case 1은 국내에서 적용하는 방식과 같이 모든 개구부를 폐쇄상태로 가정하였으며, 두 번째 조건인 Case 2는 Case 1과 상반되게 모든 개구부를 개방상태로 가정하였다. 또한 세 번째 조건인 Case 3은 화재 시를 고려하여 4층의 1개의 실의 온도를 높인 상태로 개구부가 폐쇄된 상태, Case 4는 온도를 높인 상태로 개구부를 개방한 상태이다. 여기서, 실의 온도 값은 일본건축학회의 연기제어 계획지침에서 제시하고 있는 값 중 최성기에 도달했을 때 제연설비가 작동해야 하는 적정 온도를 나타내는 값을 기준으로 하였다(AIJ, 2014). 여기서, 개구부란 기존의 설정값을 제외하고 개방과 폐쇄의 조건에 따라 누설틈새면적이 달라지는 출입문을 의미한다. 이에 대한 변수로는 방화문과, 일반 세대문, 엘리베이터 문이 있으며 엘리베이터 홀, 계단실로 통하는 문은 방화문으로 설치되어 있으며 그 외의 문은 일반 세대문으로 정의할 수 있다. 이에 대한 시뮬레이션 구동 시 설정한 값을 Case별로 정리한 것은 Table 3에서 나타난 바와 같다.

3.3 시뮬레이션 구동 결과

위에서 나타난 바와 같이, 일반적인 온도일 때의 개구부가 폐쇄된 경우인 Case 1, 일반적인 온도일 때 개구부가 개방된 경우인 Case 2, 화재가 발생하였을 때 실의 온도가 상승한 상태에서 개구부가 모두 폐쇄된 경우인 Case 3, 화재 시 실의 온도가 상승한 상태에서의 개구부가 모두 개방된 경우인 Case 4를 바탕으로 시뮬레이션을 구동한 결과는 Figs. 4-7과 같이 나타난다. 여기서, 그래프로 나타난 부분은 나타난 해당 부분의 압력차, 중앙의 숫자는 층 수를 의미한다. 또한 빨간색 네모칸으로 표현된 부분은 중성대의 위치를 나타내고 있다.

Table 3. Simulation Value of Each case (AIJ, 2014)

Case	Temperature	Opening Flow Area
Case 1 (All of opening closed)	Ambient Temperature: 20 °C Room Temperature: 28 °C	Single Fire Door 7.98×10 ⁻³ [m ²]
		Double Fire Door 15.96×10 ⁻³ [m ²]
Case 2 (All of opening opened)	Ambient Temperature: 20 °C Room Temperature: 28 °C	Single Door: 0.023 [m ²]
		Double Door: 0.045 [m ²]
Case 3 (Set up a Fire room, All of opening closed)	Ambient Temperature: 20 °C One room Temperature of 4th Floor: 80 °C Other Room Temperature: 28 °C	Single Fire Door: 7.98×10 ⁻³ [m ²]
		Double Fire Door: 15.96×10 ⁻³ [m ²]
Case 4 (Set up a Fire room, All of opening opened)	Ambient Temperature: 20 °C One room Temperature of 4th Floor: 80 °C Other Room Temperature: 28 °C	Single Door: 0.023 [m ²]
		Double Door: 0.045 [m ²]

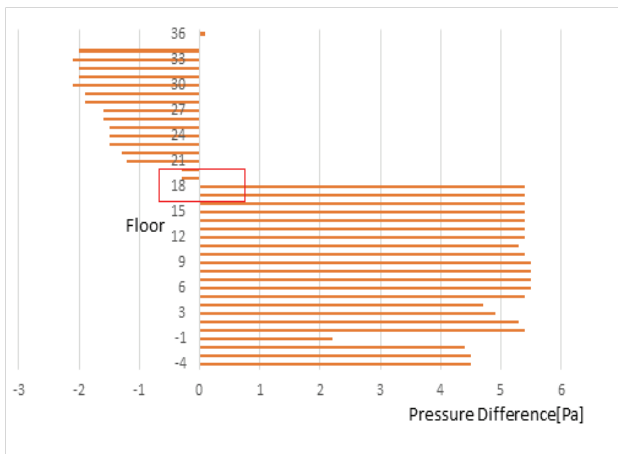


Fig. 4. Result of Case 1

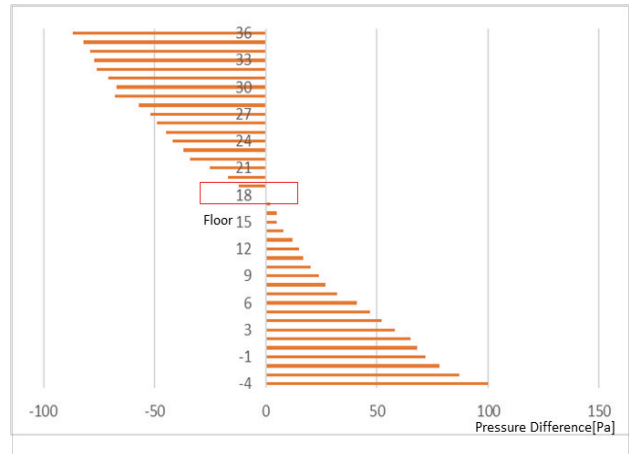


Fig. 5. Result of Case 2

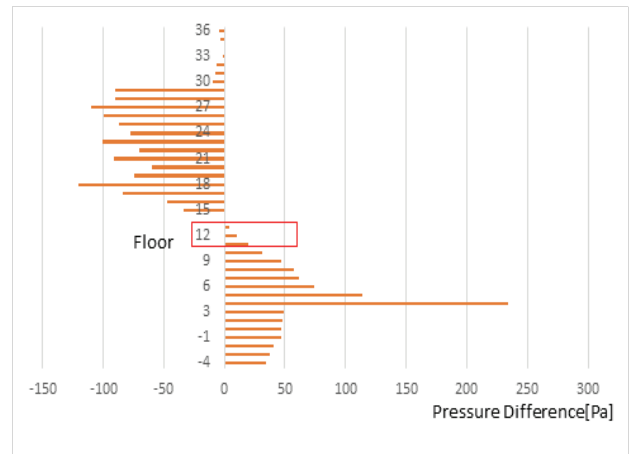


Fig. 6. Result of Case 3

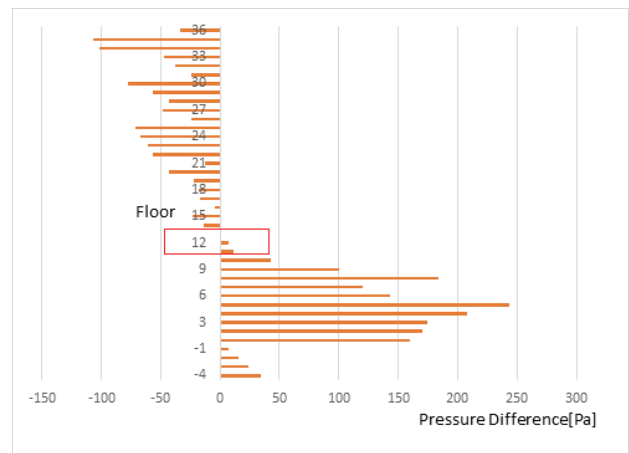


Fig. 7. Result of Case 4

Case 1에서 4가지 각각의 시뮬레이션 결과를 확인한 결과 Case 1의 경우에는 일반상황에서 개구부가 폐쇄된 상태로써 중성대는 17~18층 위치 쯤에 나타났으며, 압력차는 0~6 Pa에서 대부분 비슷한 압력차 값이 확인되었다. Case 2의 경우 개구부를 개방시킨 상태에서 Case 1과 마찬가지로

건축물의 중간인 18층의 부근에서 중성대가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 층 수에 따라 0~100 Pa의 범위로 압력차가 크게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. Case 3의 경우 4층의 한 개의 실을 화재실로 가정하여 온도를 설정하고, 모든 개구부는 폐쇄상태로 하였다. 그 결과 13층에서 중성대가 나타나는 것을 확인하였으며 화재층 부근에서 가장 큰 압력차를 나타내었고, 다른층의 경우 0~100 Pa의 정도로 고른 압력차 분포를 나타내었다. Case 4의 경우에는 4층의 한 개의 실을 화재실로 가정하여 온도를 설정하였고, 모든 개구부는 폐쇄상태로 하였다. 그 결과 중성대는 13층의 위치에서 나타났으며, 압력차는 0~300 Pa정도로 각 층의 압력차의 변동이 나타나는 것으로 확인되었다.

Case 1에서 Case 4까지의 결과를 분석한 결과 중성대의 위치의 경우 온도가 상승한 경우 일반적인 온도에서 보다 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 중성대의 위치가 변화하게 되면, 베르누이 방정식에 의해 개구부로의 기체의 수평 방향으로의 유출입에 관한 성상이 변화하며, 계획된 공기의 유량보다 더 많은 비중의 유량을 필요로 할 것으로 확인된다. 이에 따라 화재 시 온도의 변화에 따라 발생할 수 있는 중성대의 변화를 분석할 필요가 있다고 판단된다. 또한 압력차의 경우 일반적인 개구부의 개방과 폐쇄에 따라서 변화하지만, 화재가 발생하였을 경우 압력차가 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있어서 이에 대한 세밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 화재 시 연돌효과의 영향을 분석하기 위해 이론적인 고찰을 실시하고, CONTAMW시뮬레이션을 통해 압력차를 분석하여, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 연돌효과와 관련한 일반적인 수학적 모델인 Klote 모델과 국외의 연구에서 제시하고 있는 2구역 존모델의 이론적 고찰을 실시하였다. 그 결과 Klote 모델은 일반적인 상황에서 연돌효과에 대해 분석하기 위한 모델로써, 온도차와 중성대 높이를 통해 압력차를 구할 수 있으며, 2구역 존모델의 경우 연료와 환기의 형태를 고려하여 중성대 높이를 측정하고, 밀도차를 통해 압력차를 분석하는 것에 차이가 있었다. 하지만 두 개의 이론적 모델에서는 공통적으로 화재실의 온도에 따라 연돌효과의 압력차가 바뀔 수 있다는 점에서 공통적인 특징이 있는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 이론적인 고찰에서 나타난 공통적인 특성인 온도차를 고려한 압력차의 결과를 확인하기 위해 시뮬레이션 구동을 위해 Case 1, 2는 일반적인 상황에서의 개구부 개폐, Case 3, 4는 화재실을 가정한 상황에서 개구부의 개폐에 따라 시뮬레이션을 구동하였다. 시뮬레이션 구동 결과 일반상황에서는 18층에서 중성대가 나타나

며, 값이 균일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 화재실을 가정한 상황에서는 13층에서 중성대가 나타났으며, 압력차 값이 250 Pa 이상 정도로 큰 값이 나타났으며, 압력차의 분포도 불균일한 특성이 나타났다. 따라서 화재를 고려한 연돌효과의 면밀한 분석이 필요할 것으로 사료된다.

- (3) 향후에는 본 연구에서 진행되지 않은 화원의 위치변화, 현장실측, 축소모형실험 등의 추가적인 연구를 통해 화재실의 온도를 고려한 적정 압력의 분포를 분석하여 인명안전코드의 연기제어설비 설치기준 개선을 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 소방대응력 향상을 위한 연구개발사업(NFA002-010-01030000-2020)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineer (ASHRAE). (2015). *ASHRAE handbook. Heating, venting and air-conditioning applications*. Atlanta, GA, USA: ASHRAE.

Architectural Institute of Japan (AIJ). (2014). *Building smoke control design guide*.

Harmathy, T.Z. (1972). A new look at compartment fires, part II. *Fire Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 326-351.

Jang, K.H. (2019). *A study on leakage volumes and differential pressure of inlet air exhaust dampers in a smoke control system* (pp. 53-57). Ph.D. dissertation, Kyonggi University.

Klote, J.H. (1989). *Considerations of stack effect in building fires*. NISTIR89-4035. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.

Klote, J.H. (1991). *A general routine for analysis of stack effect*. NISTIR 4588. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.

Klote, J.H., and Tamura, G. (1986). Elevator piston effect and the smoke problem. *Fire Safety Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 227-233.

Lim, C.H., Kim, B.G., and Park, Y.H. (2009). Mass flow rates and performance of natural smoke ventilators in high-rise buildings. *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 91-97.

Lim, C.H., Kim, B.G., Yeo, Y.J., and Park, Y.H. (2008). The influence of natural smoke ventilators and wind

- velocities on the stack effect in high-rise buildings. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 22, No. 4, pp. 20-26.
- NFPA 92. (2012). *Standard for smoke control system*. National Fire Protection Association (NFPA), pp. 92(6)-92(14).
- Peppes, A.A., Santamouris, M., and Asimakopoulos, D.N. (2002). Experimental and numerical study of buoyancy-driven stairwell flow in a three storey building. *Building and Environment*, Vol. 37, No. 5, pp. 497-506.
- Seo, B.H., Choi, J.H., and Hong, W.H. (2010). Prediction of smoke diffusion and minimizing methods of stack effect considering the status of opening in a high-rise building. *Journal of the Architectural Institute of Korea: Planning & Design*, Vol. 26, No. 9, pp. 259-266.
- Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association (SMACNA). (2019). *Smacna duct design fitting loss coefficients*.
- Shi, W.X., Ji, J., Sun, J.H., Lo, S.M., Fan, C.G., and Li, L.J. (2014). Experimental study on the temperature distribution in an emergency staircase of high-rise building. *APCBEE Procedia*, Vol. 9, pp. 365-369.
- Zhang, J.Y., Lu, W.Z., Huo, R., and Feng, R. (2008). A new model for determining neutral-plane position in shaft space of a building under fire situation. *Building and Environment*, Vol. 43, No. 6, pp. 1101-1108.

Received	December 28, 2020
Revised	December 30, 2020
Accepted	January 18, 2021