

초고층 건축물의 계단실 내부를 수직 상승하는 플룸의 상승시간에 관한 수치해석적 연구

Numerical Study on Vertically Rising Time of Plumes in Stairwells of High-rise Buildings

김두영* · 안찬솔**

Kim, Doo-young*, and Ahn, Chan-sol**

Abstract

The vulnerabilities of high-rise buildings to fires and the safe evacuation of the occupants therein have been consistently highlighted in the media. Unexpected natural disasters that occur frequently such as earthquakes increase the potential risk in large cities. If an earthquake with a magnitude that exceeds the load for safety design occurs and causes a fire in a high-rise building, it would lead to serious casualties among the occupants evacuating the building. This study represented the stairs in high-rise buildings using several full-scale models and examined the characteristics of a high temperature plume rising vertically from the ignition source using numerical analysis with Fire Dynamics Simulator (FDS). We analyzed the effects of calorific value and ventilation in the middle floors and examined the time taken by a plume rising vertically from the stairs to reach each floor. Furthermore, the empirical line suggested by McCaffrey (1979) was used to compare the characteristics of a plume rising vertically inside stairs and in a limited space with those of a plume rising vertically in an open space. Based on the time taken by a plume front to rise, which is calculated based on numerical analyses, this study identified and suggested an experiment equation to make it possible to predict the time taken by a plume to rise from the stairs in a typical high-rise building.

Key words : High-rise Building, Scaled Down Stairwell Model, Smoke Rise Time, CFD

요 지

매스컴에서는 초고층건축물에 화재가 발생할 경우 화재에 대한 취약점과 재실자들의 안전한 피난에 대한 문제점을 제기하고 있다. 그리고 최근에 발생한 지진과 같이 예측하지 못한 자연재해가 빈번하게 나타나서 대도시에서 안전에 대한 잠재적인 위험성이 증가하고 있다. 만약에 안전설계하중을 넘는 큰 규모의 지진이 다시 발생하여 화재가 발생하면 피난자들의 심각한 인명피해가 야기된다. 이번 연구에서는 초고층건축물 내부에 위치한 계단실을 실제 크기의 몇 가지 모델로 대표하였고, 발화원에서 발생한 고온의 플룸이 수직 상승하는 특성을 FDS를 이용해 수치해석적으로 분석하였다. 이를 통해 발열량 크기의 영향과 중간층 환기량의 영향을 분석하였고, 계단실 내부에서 수직으로 상승하는 화재연의 선단이 층별로 도달하는 시간을 분석하였다. 또한 제한된 공간인 계단실 내부에서 수직상승하는 플룸의 특성을 개방된 공간에서 수직 상승하는 플룸의 특성과 비교하기 위해 McCaffrey (1979)의 empirical line을 사용하여 비교분석하였다. 수치해석을 통해 분석된 화재연 선단의 상승시간 결과를 이용하여 일반적인 초고층 건축물의 계단실에서 화재연이 상승하는 시간을 예측할 수 있도록 실험적 관련식을 도출하여 제시하였다.

핵심용어 : 초고층건축물, 계단모형실험, 연기상승 도달시간, CFD

*정회원, 한국건설기술연구원 실내공기품질 융합연구단 박사후 연구원(E-mail: kdy1981@kict.re.kr)

Member, Post Doc., IAQRC, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 연구위원(Tel: +82-31-910-0515, Fax: +82-31-910-0515, E-mail: chansole@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Research Fellow, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

1. 서론

각국에서 만들어진 유명한 마천루 이후로 초고층건축물은 그 도시의 랜드마크로써 그 당시의 국가의 경제적 지표와 최첨단의 건축기술로 건설이 되었으며, 최근에는 계속 높이와 층수가 끝없이 높아지며 매년 경쟁하듯이 기록을 갱신하고 있다. 현재 우리나라에서 가장 높은 건축물은 2016년에 완공된 롯데월드타워(서울특별시 송파구, 555 m, 123층)이고, 현재 세계에서는 5번째로 높은 초고층건축물이다. 최근 2019년에 개정된 「초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법」에 따르면 ‘초고층 건축물이란 높이가 200 m 이상 또는 층수가 50층 이상인 건축물로 정의된다. 2019년 현재 전국에 총 94개의 초고층건축물(50층 이상은 88개가 있으며, 200 m 이상은 73개)이 건설되었다. 이제는 우리 주변에서 흔하게 초고층건축물들을 볼 수 있다.



Fig. 1. The Number of High-rise Building by Region in South Korea (2019)

Fig. 1은 2019년까지 대한민국 내 특별시 및 광역시와 도에서 초고층건축물의 현황을 보여주며 서울특별시가 39개로 가장 많고, 그다음은 부산광역시가 25개로 두 번째, 인천광역시가 24개로 세 번째로 많이 건설되었다.

초고층건축물 내부에는 환기 및 공조시스템과 엘리베이터와 계단실 등 이동수단이 다양한 목적으로 수직공간이 설계된다. 건축물 내부에서 화재가 발생하는 경우에는 가연물에 의해 생성된 유독한 무색무취의 화재연은 굴뚝효과에 의하여, 아주 뜨거운 플룸의 형태로 내부 밀도와 온도차이로 상부로 빠르게 상승한다. 이러한 사실 때문에 초고층 건축물의 내부에 만들어진 수직공간과 같은 공간에서 화재 플룸의 이동 및 확산하는 현상을 이해하는 것이 매우 중요한 의미가 있다.

하지만, 다수의 매스컴에서 초고층건축물에 화재가 발생할 경우 높은 수직공간의 특성에 따른 화재에 대한 큰 취약점과 다수의 재실자들의 안전하고 최적화된 피난거리 및 계획

에 따른 문제점들이 꾸준히 제기되고 있다. 특히, 최근에 경주와 포항에서 발생한 지진과 태풍에 의한 침수 피해 등 예측하지 못한 큰 규모의 자연재해가 빈번하게 나타나서 초고층건축물이 많은 대도시에서 안전에 대한 잠재적인 위험성이 급격하게 증가하고 있다. 만약에 기존의 초고층건축물의 안전설계하중을 넘는 큰 규모의 지진이 다시 발생하여 화재가 발생하면 피난자들의 심각한 인명피해가 일어나는 것은 명약관화한 일이다.

중형비가 크게 차이 나는 수직공간과 인접한 구획에서 화재가 일어나고 발생한 뜨거운 플룸이 수직공간의 하부에 만들어진 열린 구역을 통해 유입되어 수직으로 상승하는 플룸의 확산 현상에 대한 많은 연구가 수행하였다. 이에 대해 Cooper (1998)는 전통적인 zone형태의 구획화재 모델링이 엘리베이터나 배기덕트와 같이 큰 중형비를 갖는 공간에 대한 준 안정기의 부력 기둥을 분석하기에 부적합함을 지적하고, 이러한 제한을 극복하기 위해 모델 방정식을 개발하였다. 또한 Quintiere (2002)는 실내 화재로 인한 성층화를 고려한 1구역 구획 기상 모델에 대하여 근사수학공식을 이용하여 화재의 중요한 물리적 특징을 설명하였다. Harish and Venkatasubbaiah (2013), Ji et al. (2015), Chen et al. (2016), Ji et al. (2016)등이 수직공간의 환기 조건에 대한 자세한 연구를 진행하였다. 특히 Qi et al. (2014)은 환기 조건에 따라 일정한 연기 유량을 갖거나 스택효과가 작용하고 있는 고층 구조물에서의 연기운동을 분석하기 위한 이론 모델을 개발하였다. 건축물의 화재 상황에서 수직공간과 같은 제한된 공간에 대한 화재 연기의 이동 및 확산 현상을 실험적으로 관찰하기 위한 연구로 Tanaka et al. (2000)은 열린공간을 포함해 여러가지 형태의 수직공간을 대상으로 화염에 의한 플룸의 상승 시간을 측정하였다. 한편 수직공간에서 발생하는 스택효과를 관찰하기 위해 Zhang et al. (2006)은 긴 수직축에 대해 서로 다른 전산유체역학 모델을 사용하여 수치 예측을 하고 실험에서 얻은 실험 데이터와 결과를 비교하였고, 건축물 화재 시에 수직공간 내부의 중립면의 위치를 예측하기 위해 Zhang et al. (2008)은 샤프트의 공간을 화재구역과 내부 공간으로 나눈 모델을 제시하였다.

이번 연구에서는 초고층건축물 내부에 위치한 실체모형의 계단실을 모델링하여 발생한 화재의 뜨거운 플룸이 수직 상승할 때, 뜨거운 플룸의 온도 T와 수직 상승 유속 w와 발열량의 변화를 분석하였다. 그리고 계단실에서 높이가 15층(60 m)과 30층(120 m)으로 모델링을 하였고, 발열량의 영향의 분석하기 위하여 2-20 MW일 경우 4가지 시나리오와 중간층의 환기량의 영향을 분석하기 위하여 문의 개방여부에 따른 2가지 시나리오를 FDS로 수치해석을 수행하였다. 그래서 계단실 내부의 온도, 유속, 압력, 밀도의 측단면 등고선과 화재연의 선단이 층별로 도달하는 시간을 다양한 시나리오를 비교 검증하였다. 하지만 본 연구에서는 고층건축물의 수직공간에서 발생하는 스택효과와 중성면에 대해서는 고려하지

않았다. 또한 갇힌 계단실 내부에서 수직상승하는 플룸의 특성을 연린 공간에서 자연부력에 의해 수직 상승하는 플룸의 특성과 비교하기 위해 McCaffrey (1979)의 empirical line 을 사용하여 분석하였다.

2. 초고층 계단실 수치해석 모델링 설명

2.1 Fire Dynamics Simulator(FDS) 개요

본 연구에서 사용한 FDS ver. 6.7.0은 미국 NIST의 BFRLL 그룹에서 개발한 공개용 소프트웨어이다. 화재에 의해 유도된 유동현상, 유체 및 고체 내부의 열전달현상, 가연물의 연소현상을 해석하는데 주로 사용된다. Fire Dynamics Simulator User's Guide (McGrattan et al., 2013a)에서는 FDS가 사용하고 있는 Hydrodynamic Model, Combustion Model, Radiation Transport에 관하여 설명하고 있으며, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1 (McGrattan et al., 2013b)에서는 FDS가 사용하고 있는 Governing Equation과 Large Eddy Simulation model에 관하여 설명하고 있으며 그 내용은 다음과 같다. FDS에서 사용하고 있는 Hydrodynamic Model은 화재로부터 유도되는 연소가스와 열전달 현상에 주안점을 두고 있기 때문에 열적으로 유도되는 유동의 흐름을 저속의 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치적으로 해석한다. 핵심 알고리즘으로는 공간 및 시간에 대해 Second Order의 Explicit predictor-collector scheme을 사용하고 있으며 난류는 Large Eddy Simulation (LES)을 deardorff 형태로 처리하여 해석한다.

2.2 시뮬레이션 모델의 격자 독립성

FDS에서는 모델의 계산격자를 화원의 무차원 특성길이 ($D^*/\delta x$)에 기초하여 설정하는 방식이 이용되고 있으며 화원 특성반경(Characteristic Fire Diameter) D^* 는 다음 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

여기에서 δx 는 격자의 크기를 의미하며 \dot{Q} 는 총 발열량을 의미한다. 본 연구에서는 격자 해상도를 무차원 특성길이가 89 이상이 되도록 설정하여 수치해석을 수행하였다.

2.3 실제 크기 화재 스케일 모델 세부사항

실제 크기의 건축물 계단실에서 화재 연기가 상승하는 현상을 수치해석적으로 분석하기 위해 실물 사이즈의 계단실을 Fig. 2와 같이 수치해석 모델링하였다. 한 층은 복도 또는 거실과 전실 및 계단실로 구성되었는데, 계단실의 크기는 $2.8 \times 5.4 \times 4.0 \text{ m}^3$ 이고 전실의 크기는 $2.8 \times 1.4 \times 2.6$

m^3 , 거실의 크기는 $2.8 \times 2.8 \times 2.6 \text{ m}^3$ 로 모델링하였으며, 한 층의 크기는 $2.8 \times 10.0 \times 4.0 \text{ m}^3$ 로 하였다. 거실과 전실, 계단실의 벽면에는 크기가 $1.0 \times 2.0 \text{ m}^2$ 인 3개의 문이 각각 설치되어 공간을 연결해주며, 거실에 설치된 문은 외부와 연결되어 있다. 계단실의 천장면과 바닥면에는 $2.8 \times 4.1 \text{ m}^2$ 의 층간 개방구가 설치되어 각 층의 계단실을 하나의 공간으로 연결하고 있다. 계단실의 수치해석 모델은 15층과 30층의 두 가지를 설정하였는데, 수치해석 도메인의 크기는 각각 $2.8 \times 10.0 \times 60.0 \text{ m}^3$ 와 $2.8 \times 10.0 \times 120.0 \text{ m}^3$ 이고, 격자수는 $28 \times 100 \times 600$ (1.68 M)개와 $28 \times 100 \times 1,200$ (3.36 M)개를 사용하였다.

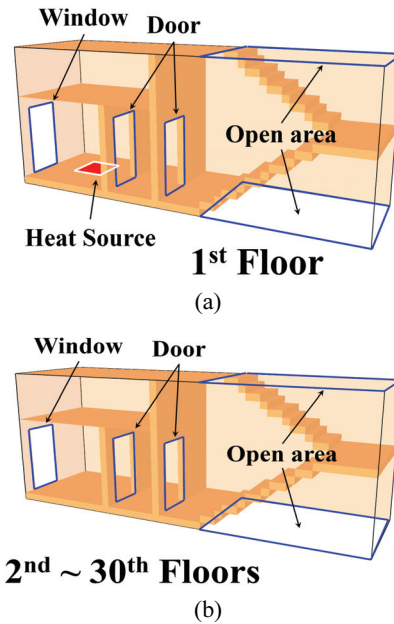


Fig. 2. The Detailed Structure of Each Floor of 60 m and 120 m Buildings for Large-scale Fires (2~20 MW)

계단실 1층 거실의 바닥 중앙에 열원을 설정하였는데, 실제 화재실험에서 발열원의 연료로 헵탄과 옥탄이 주로 사용되고 있기 때문에 본 수치해석에서도 옥탄을 발열원으로 사용하였고, 옥탄의 물질지수는 Table 1과 같다.

Table 1. Fuel Index of Octane

Molecular Weight	114.23 g/mol
Ambient Density	4.75 kg/m ³
Enthalpy of Formation	-1.83×10 ⁶ J/kg
Heat of Combustion	43,398.60 kJ/kg

열원의 발열량을 2.0, 5.0, 10.0, 20.0 MW의 4가지 시나리오로 분류하여 수치해석을 진행하였다. 해석영역의 경계면은 모두 벽면으로 설정하였고 경계면에서의 유동은 개구부

로 설정한 부분으로만 유동이 출입하도록 설정하였으며, 모든 벽면에는 Non-slip 경계조건을 적용하여 벽면에서 발생하는 경계층을 고려하였다. 벽면에는 Table 2와 같이 콘크리트의 열물성을 적용하여 뜨거운 플룸과 벽면 사이에 발생하는 열전달 현상을 고려하였다. 또한 열전달 모델은 열원으로 부터 발생한 열 플럭스가 모두 대류에 의해 열전달이 된다고 가정하였으며, 복사에 의한 열전달은 고려하지 않았다.

Table 2. Thermal Properties of Concrete

Conductivity	1.7 W/(m·K)
Specific Heat	0.9 kJ/(kg·K)
Density	2,300 kg/m ³
Thickness	0.2 m

난류해석을 위한 LES모델은 FDS에서 제공하는 WALE model을 사용하였고, 모델링에 사용한 대기의 조건은 20.0 °C에서의 표준 대기 조건을 적용하였으며, 대기의 습도는 없는 것으로 가정하였다. 그리고 FDS를 사용하여 계단모형의 수치해석 모델을 3,600초 동안의 transient 유동으로 해석하였는데, 이를 위해 Intel Xeon E5-2680 V2 시스템이 사용되었으며 256core를 병렬연산하여 약 730시간동안 계산하였다.

3. 결과비교 및 고찰

3.1 실제 크기 화재 스케일 모델 수치해석 결과

Fig. 3은 실제 크기의 계단실 모델을 FDS로 수치해석한 결과를 보여주는 그림으로, 발열량을 2, 5, 10, 20 MW로 하여 수치해석 하였을 때, 온도 T와 수직 상승 유속 w의 등고선을 보여주는 축 단면의 그림이다.

온도 T의 변화는 Fig. 3(a)를 통해 관찰할 수 있는데, 열원의 발열량이 증가할수록 뜨거운 플룸의 온도가 높은 층까지 유지되는 것을 확인할 수 있다. 또한 계단실의 문이 모두 닫혀있는 경우에는 화재 층에서 발생한 뜨거운 플룸이 계단 구조물을 따라 상승하면서 구조물과 열 교환이 이루어지고, 이로 인해 상층부로 올라 갈수록 온도가 서서히 낮아지고 있는 것을 확인할 수 있다. 계단실의 모든 문이 열려있는 경우에는 개방된 계단실 문의 상부를 통해 고온의 기류가 빠져 나가고, 하부를 통해 저온의 외부 공기가 계단실로 유입되기 때문에 상층부로 올라 갈수록 뜨거운 플룸의 온도가 더 빠르게 낮아지고 있음을 확인할 수 있다.

수직 상승 유속 w의 변화는 Fig. 3(b)를 통해 확인할 수 있는데, 수직 상승 유속의 경우에도 발열량이 증가할수록 수직 상승하는 유속이 높고, 높은 층까지 상승 모멘텀이 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 온도의 경우에서와 동일한 이유로 계단실의 문이 모두 열린 경우가 모두 닫힌 경우보다 유속이 낮고, 수직 상승 모멘텀이 유지되는 높이도

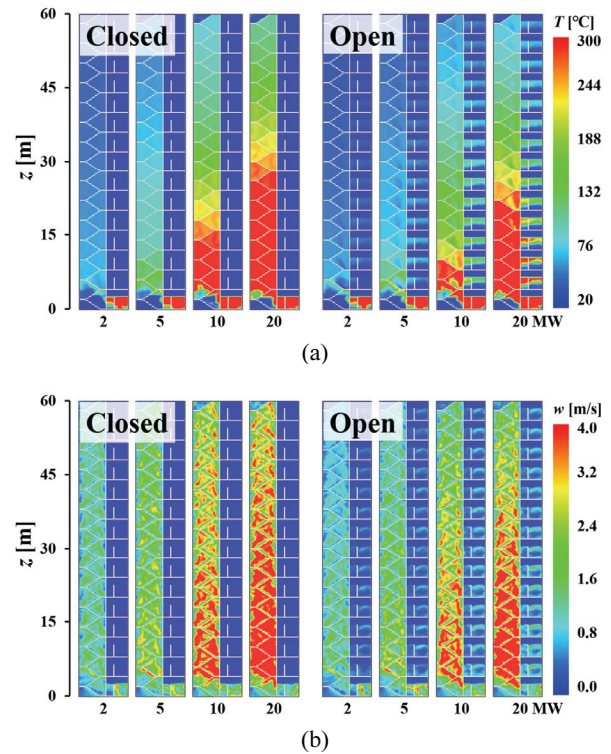


Fig. 3. Contours of w, T at 60 m Staircase

상대적으로 낮음을 확인하였다.

Fig. 4는 실제 크기의 계단실 모델을 FDS로 수치해석한 결과를 보여주는 그림으로, 발열량을 2, 5, 10, 20 MW로 하여 수치해석 하였을 때, 공기밀도 ρ 및 내부 압력 P의 등고선을 보여주는 축단면의 그림이다.

압력 P의 경우에는 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이, 계단실의 문이 모두 닫혀있는 환경에서는 열원에서 자연부력에 의해 뜨거운 플룸이 생성되고 계단실로 유입되는데, 뜨거운 플룸이 수직 상승하면서 몇 개 층에서는 부압의 영역을 형성하지만, 뜨거운 플룸이 그 이상으로 상승하면 압력이 점차 증가되면서 양압의 영역이 형성되었다가, 최고층의 출구에서는 다시 대기압으로 회복되는 현상을 볼 수 있다. 특히 열원의 발열량이 증가할수록 부압 및 양압의 크기와 범위가 커짐을 확인할 수 있다. 반면, 계단실 문이 모두 열린 환경에서는 각 층의 계단실 마다 국부적인 부압 및 양압의 영역이 발생하기는 하지만, 여러 층에 걸친 부압 또는 양압의 영역이 생성되지는 않았다.

밀도 ρ 의 경우에는 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이, 열원에서 발생한 뜨거운 플룸은 외부의 대기보다 낮은 밀도의 상태로 계단실로 유입되어 수직 상승하다가 최고층의 출구에서 대기의 밀도로 회복되는 것을 관찰하였다. 계단실 문이 모두 닫혀있는 환경에서는 저밀도의 뜨거운 플룸이 발생하고, 아래층 부분에서 여러 층에 걸쳐 저밀도 영역을 형성하지만, 뜨거운 플룸이 수직 상승하면서 밀도가 서서히 상승하여 최고층의 출구에 도달해서는 다시 대기의 밀도로 회복되는

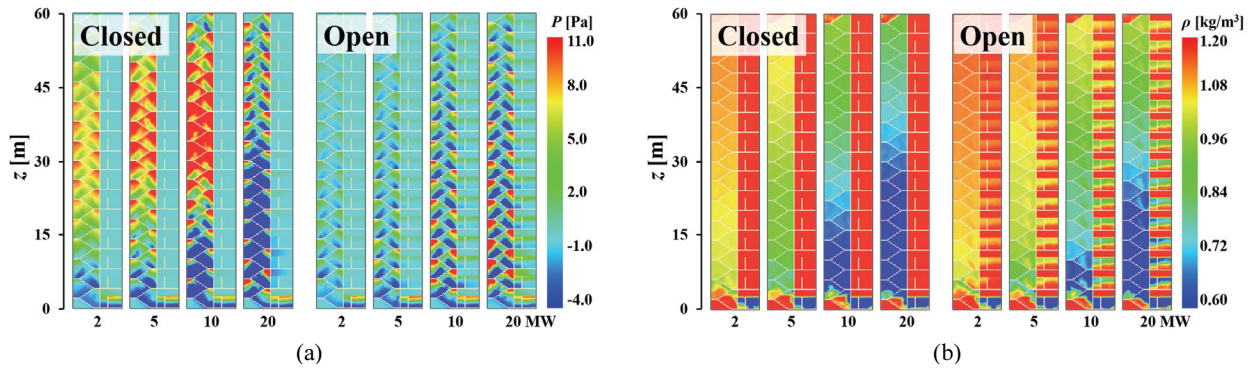


Fig. 4. Contours of P , ρ at 60 m Staircase

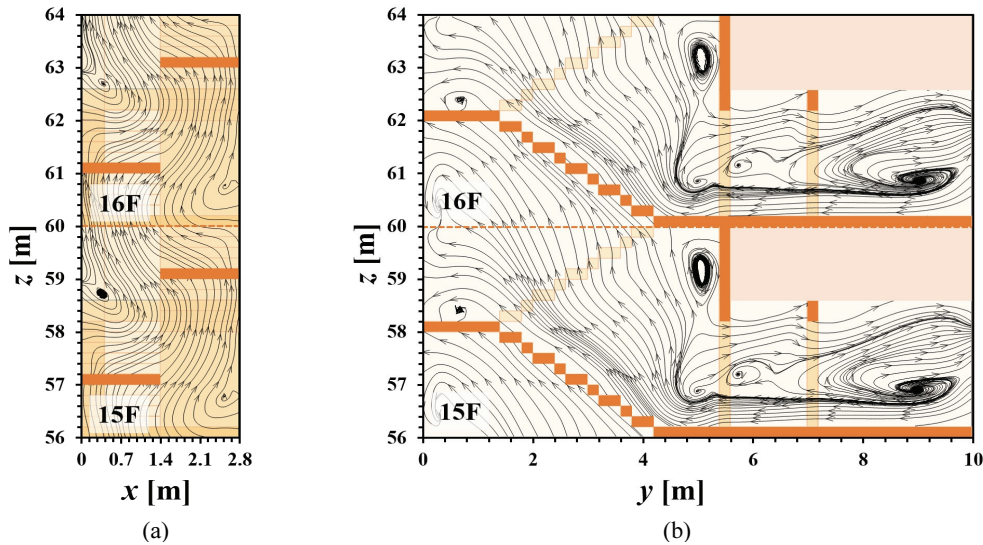


Fig. 5. Stream Line Plot of Staircase Sections

것을 확인할 수 있으며, 이때 열원의 발열량이 증가할수록 저밀도의 영역이 커짐을 확인하였다. 반면, 계단실의 문이 모두 열린 환경에서는 각 층마다 계단실을 이동하는 뜨거운 플룸의 일부가 외부로 빠져나가고 외부의 공기가 유입되기 때문에, 저층부의 저밀도 영역의 범위가 상대적으로 적어짐을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 FDS를 이용하여 수치해석한 실물 크기의 계단실 중 15층~16층에 대한 내부 유동을 stream line으로 보여주는 그림이다. Fig. 5(a)는 계단실의 정면으로부터 거리 y 가 2.8 m인 지점에서 x - z 단면에 대한 stream line을 보여주고 있다. stream line은 아래층에서 상승해 올라온 뜨거운 플룸이 계단 구조물의 저항을 받아 좌·우로 굽이치며 상승하는 과정을 보여주고 있다.

Fig. 5(b)는 계단실의 측면으로부터 거리 x 가 0.9 m인 지점에서 y - z 단면에 대한 stream line을 보여주고 있다. 오른쪽 벽면에 외부와 연결된 문을 통해 위쪽으로는 뜨거운 플룸의 일부가 계단실을 빠져나와 전실과 거실의 천장면을 따라 왼쪽에서 오른쪽으로 배출되고, 아래쪽으로는 저온의

외부 공기가 오른쪽에서 왼쪽으로 거실과 전실의 바닥면을 이동하면서 계단실로 유입되는 것을 확인할 수 있으며, 두 기류가 만나는 거실과 전실의 공간에는 두 경계층이 만나면서 생성된 강한 와류가 발생하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 6은 실물 크기의 계단실 모델을 FDS로 수치해석한 결과를 McCaffrey (1979)의 empirical line과 비교하여 보여주는 그림이다. 그림은 계단실의 높이가 60 m와 120 m인 모델에 열원의 발열량을 5, 10, 20 MW로 설정하였을 때, 중간층의 문이 모두 열린 경우와 모두 닫힌 경우에 대하여 각 층의 계단실 중앙에서 측정된 온도 T 와 수직 상승 유속 w 의 변화를 보여주고 있다.

온도 T 의 경우, 높이가 60 m와 120 m인 계단실에서 모든 발열량 5, 10, 20 MW에 대한 온도 예측 결과가 McCaffrey의 empirical line의 값보다 약 1/4 정도 되는 값으로 예측되어 아래쪽으로 이동되었지만 경향은 유사하게 따르고 있음을 Figs. 6(a)와 6(c)를 통해 확인할 수 있다. FDS 수치해석을 통해 예측한 온도 T 가 empirical line 보다 아래쪽으로 이동된 것은, 제한된 조건에서 열원으로부터 발생한 뜨거운 플룸이

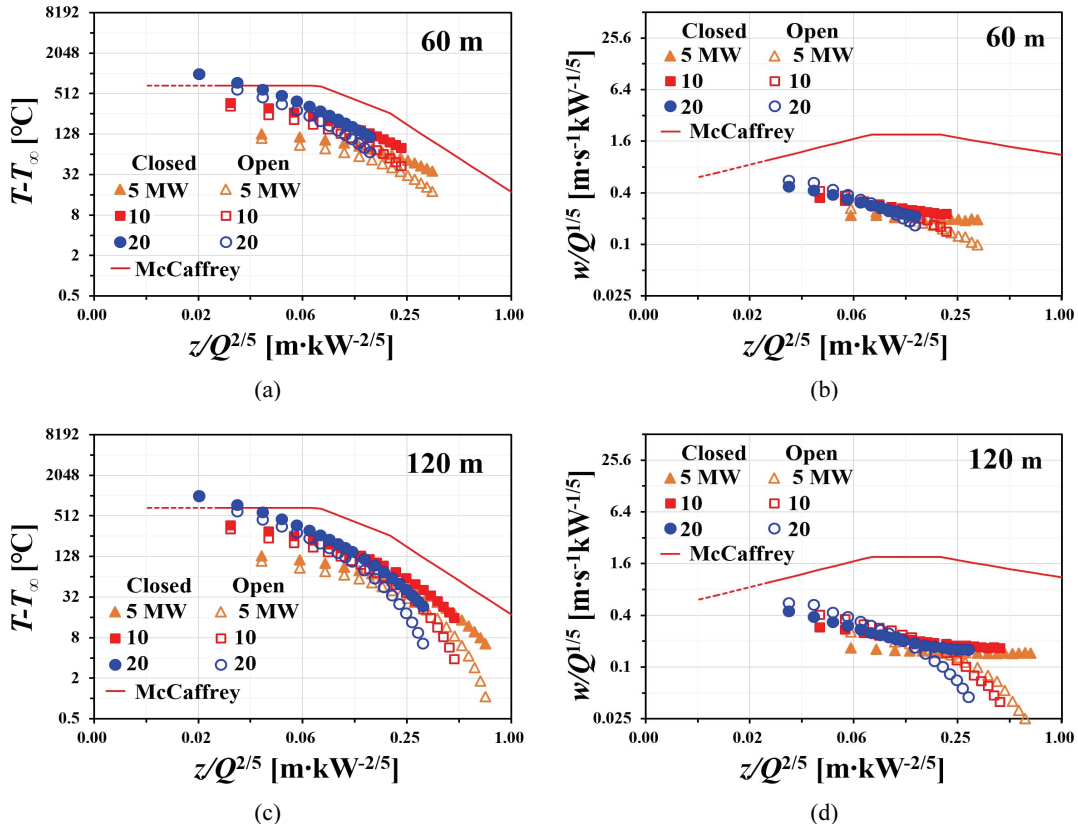


Fig. 6. Temperature (T) and Velocity (w) Distribution Along z of the Large-scale Fires Inside a Building of 60 m and 120 m Height. (a) T inside 60 m building, (b) w inside 60 m building, (c) T inside 120 m building, (d) w inside 120 m building. Bot w and z are scaled by $Q^{1/2}$ and $Q^{2/5}$, respectively, for data collapse. These FDS results are compared with the McCaffrey's open-air plume empirical data

계단실로 유입되어 수직으로 상승하는 과정에서 벽면 및 계단 구조물로 열전달이 진행된 것이 주요 원인으로 추정된다. 또한 계단실과 연결된 문의 개폐 여부에 따라 결과를 비교하였을 때, 계단실의 문의 개폐 여부에 따라 열려 있는 경우보다 약간 높게 측정되었지만 60 m 이하에서는 그 차이가 크지 않은 것으로 분석되었으나, 계단실의 문의 개폐 여부에 따라 열려 있는 경우에는 60 m 이상의 높이에서 뜨거운 플룸의 온도가 급격히 낮아지는 것으로 분석되었다.

수직 상승 유속 w 의 경우, 높이가 60 m와 120 m인 계단실에서 모든 발열량 5, 10, 20 MW에 대한 수직 상승 유속의 예측 결과가 McCaffrey의 empirical line의 값보다 약 1/6 정도의 값으로 예측되어 아래쪽으로 이동되었음을 Figs. 6(b)와 6(d)를 통해 확인할 수 있다. FDS 수치해석을 통해 예측한 수직 상승 유속 w 가 empirical line 보다 아래쪽으로 이동된 이유는, 계단실의 벽면 및 계단 구조물이 뜨거운 플룸의 수직 상승 모멘텀을 감소시키는 저항체로 작용하고 있기 때문으로 추정된다. 또한 수직 상승 유속이 감소하는 추세 역시 empirical line의 감소 추세보다 약간 더 급격한 것으로 분석되었다. 또한 계단실과 연결된 문의 개폐 여부에 따라 결과를 비교하였을 때, 60 m 이하에서는 계단실 문의 개폐 여부에 관계없이 유사한 값을 보였으나, 60 m 이상에서

계단실의 모든 문의 닫혀있는 경우에는 수직 상승 유속이 일정하게 유지되는 경향을 보였으며, 계단실의 모든 문의 열려있는 경우에는 수직 상승 유속이 급격하게 낮아지는 것으로 분석되었다.

계단실 내부에서 뜨거운 플룸의 수직 상승하는 현상을 분석해 보았을 때, 내부에 저항체가 존재하는 수직공간에서 뜨거운 플룸이 수직 상승할 경우, 높이에 따른 온도 T 와 수직 상승 유속 w 의 변화는 열린 공간에서 수직 상승하는 뜨거운 플룸의 특성과 다르기 때문에, McCaffrey의 empirical line으로 예측하는 것은 어려우며, 이를 예측하기 위한 새로운 empirical line이 제시될 필요가 있다.

3.2 연기의 선단이 층별로 도달하는 시간

실제 크기의 계단실 모델의 내부에서 화재 연기가 계단실을 통해 수직으로 상승할 때, 연기의 선단이 층별로 도달하는 시간을 분석하였는데, 각 계단실의 문의 개폐 여부에 따라 열려 있는 경우와 닫혀 있는 경우를 구분하고 발열량의 크기 별로 분석하였다. 발열량이 증가할수록, 계단실의 높이가 낮을수록 연기의 선단의 상승 시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 FDS를 이용하여 60 m 높이의 계단실 모델을 수치해석한 결과로, 2, 5, 10, 20 MW의 열원으로부터 연기가

발생한 후 100초가 되는 순간의 모습을 계단실의 문이 모두 열린 경우와 모두 닫힌 경우로 구분하여 비교한 그림이다. Fig. 6에서와 같이 발열량이 커질수록 연기의 선단이 수직으로 상승하여 동일 높이까지 도달하는데 소요되는 시간이 짧아지는 것을 알 수 있으며, 계단실의 문이 모두 닫혀 있는 경우가 모두 열려있는 경우보다 연기의 선단이 수직으로 상승하여 동일 높이까지 도달하는데 소요되는 시간이 짧아지는 것을 알 수 있다.

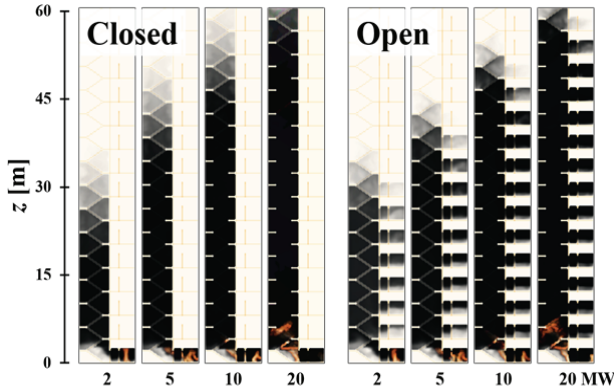


Fig. 7. Smoke Rising at 100 Seconds in 60 m Staircase

Figs. 8(a), 8(b)는 계단실의 높이가 60 m일 경우, 연기의 선단이 층별로 도달하는 시간을 발열량의 크기에 따라 나타낸 그림이다. 계단실의 문이 모두 닫혀 있을 경우에는 Fig. 8(a)와 같이 연기의 선단이 상승하는 시간은 비교적 일정하게 유지되어 직선의 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

반면, 계단실의 문이 모두 열려 있을 경우에는 Fig. 8(b)와 같이 연기의 선단이 상승하는 시간이 반비례하게 늘어나 2차 곡선의 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 계단실 내부의 뜨거운 플룸이 상승할수록 외부로 배출되는 유량이 증가하기 때문에 뜨거운 플룸의 상승 모멘텀이 감소하면서 발생하는 현상으로 추정된다.

Figs. 8(c), 8(d)는 계단실의 높이가 120 m일 경우, 연기 선단이 층별로 도달하는 시간을 발열량의 크기에 따라 나타낸 그림이다. 계단실의 문이 모두 닫혀 있을 경우에는 Fig. 8(a)와 유사하게 연기 선단이 상승하는 시간이 일정하게 유지되는 것을 Fig. 8(c)를 통해 확인할 수 있으나 동일한 층을 비교했을때, 계단실의 높이가 60 m인 경우보다 시간이 더 오래 걸리는 것을 확인할 수 있다. 또한 계단실 문이 모두 열려 있을 경우에서도 Fig. 6(b)와 유사하게 연기의 선단이 상승하는 시간이 반비례하게 늘어나는 것을 확인할 수 있으며, 연기 선단의 상승 시간이 계단실의 높이가 60 m인 경우와 동일한 것을 확인할 수 있다.

계단실에서 연기 선단의 상승시간을 예측하기 위한 방법으로, 높이 z의 값으로 비례추소해지면 Fig. 9와 같이 발열량과 계단실의 높이에 따른 연기의 선단의 상승 시간을 하나의 표로 나타낼 수 있다. Fig. 9(a)는 계단실의 문이 모두 닫힌 경우에 대하여, 계단실의 높이가 60 m와 180 m에서 열원의 발열량이 2, 5, 10, 20 MW로 설정되었을 때, 연기의 선단의 수직 상승하는 속도를 보여주고 있으며, 이들의 경향을 Trend line으로 대표하여 표현하고 수식 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

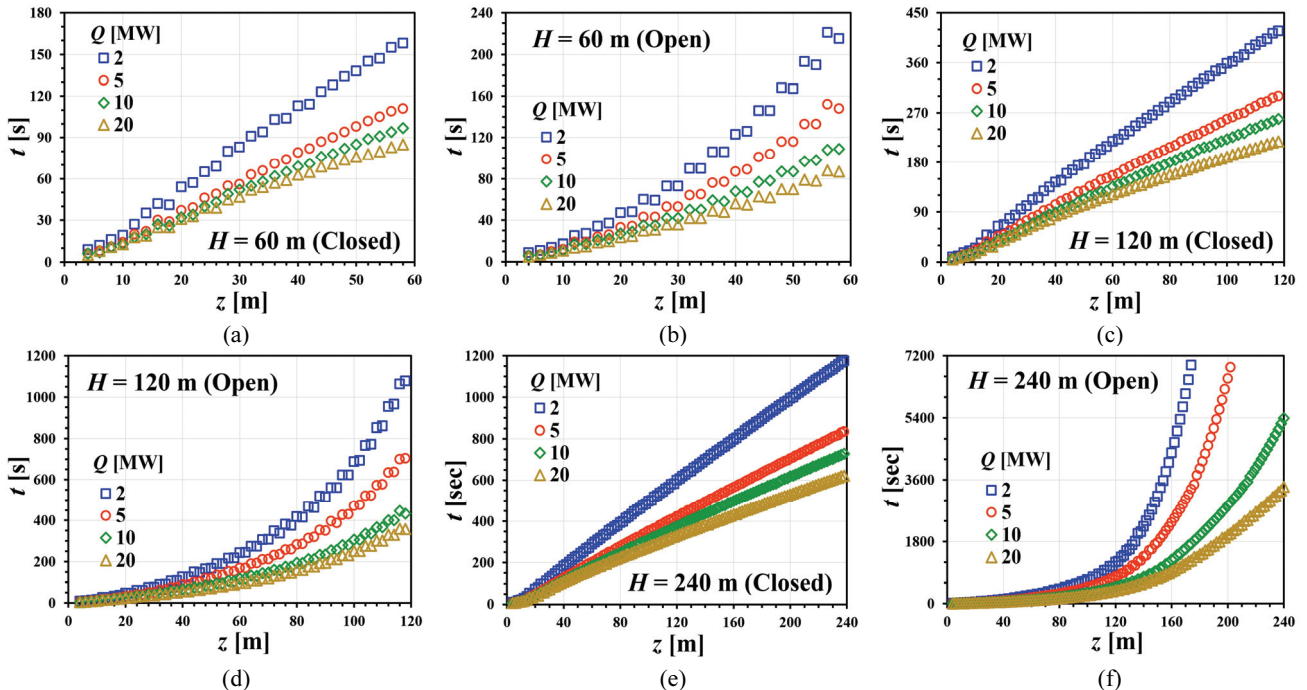
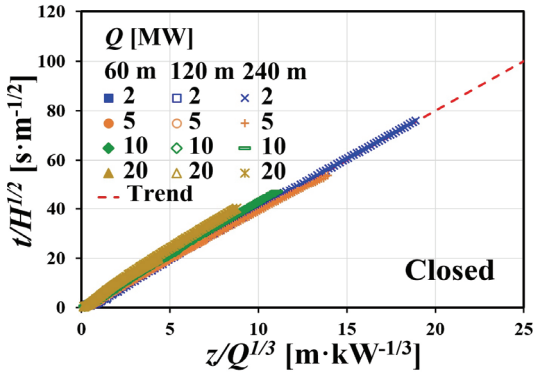
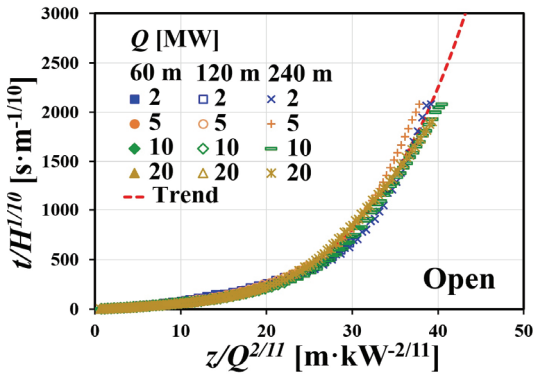


Fig. 8. Smoke Rising Time in 60, 120, 240 m Staircase



(a)



(b)

Fig. 9. Trend Line of Smoke Rising Time in Staircase

$$\frac{t}{H^{1/2}} = 4 \frac{z}{Q_z^{1/3}} \quad (2)$$

여기서, t 는 초 단위의 시간(s)이며, z 는 연기의 선단이 상승하는 높이(m)이고, H 는 계단실의 총 높이(m), Q_z 는 열원의 발열량(kW)이다.

또한 Fig. 9(b)는 계단실의 문이 모두 열린 경우에 대하여, 계단실의 높이가 60 m와 180 m에서 열원의 발열량이 2, 5, 10, 20 MW로 설정되었을 때, 연기의 선단이 수직 상승하는 속도를 보여주고 있으며, 이들의 경향을 Trend line으로 대표하여 표현했을 때, 이 Trend line은 수식 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{t}{H^{1/10}} = 8.0 \times 10^{-4} \frac{z^4}{Q_z^{8/11}} + 5 \frac{z}{Q_z^{2/11}} \quad (3)$$

여기서, 경험식 Eqs. (2)와 (3)은 발열량의 증가만 고려하여 제안된 연기의 선단의 수직 상승 속도식이며, 계단실 단면적의 크기, 계단실 내부와 외부의 온도차이, 스택효과 등의 영향은 고려되지 않았다.

Ji et al. (2013)은 1/3 크기로 축소된 12층의 계단실 실험을 통해 발열량이 증가함에 따라 풀파이어에서 발생한 연기의 선단이 상승하는 시간을 높이 별로 측정하였고, 그 결과로 연기의 선단이 상승하는 시간은 발열량의 1/3 지수 승에 반비례하는 것을 관찰하였다. 따라서 FDS를 이용하여 수치 해석한 연기 선단의 상승 시간에 대한 분석결과를 Ji et al.의 분석방법을 통해 Fig. 10과 같이 정리하고 비교해 보았다. Figs. 10(a), (b)는 60 m의 계단실에서 연기가 상승하는 시간을 분석한 그래프로써, 발열량이 증가함에 따라 연기

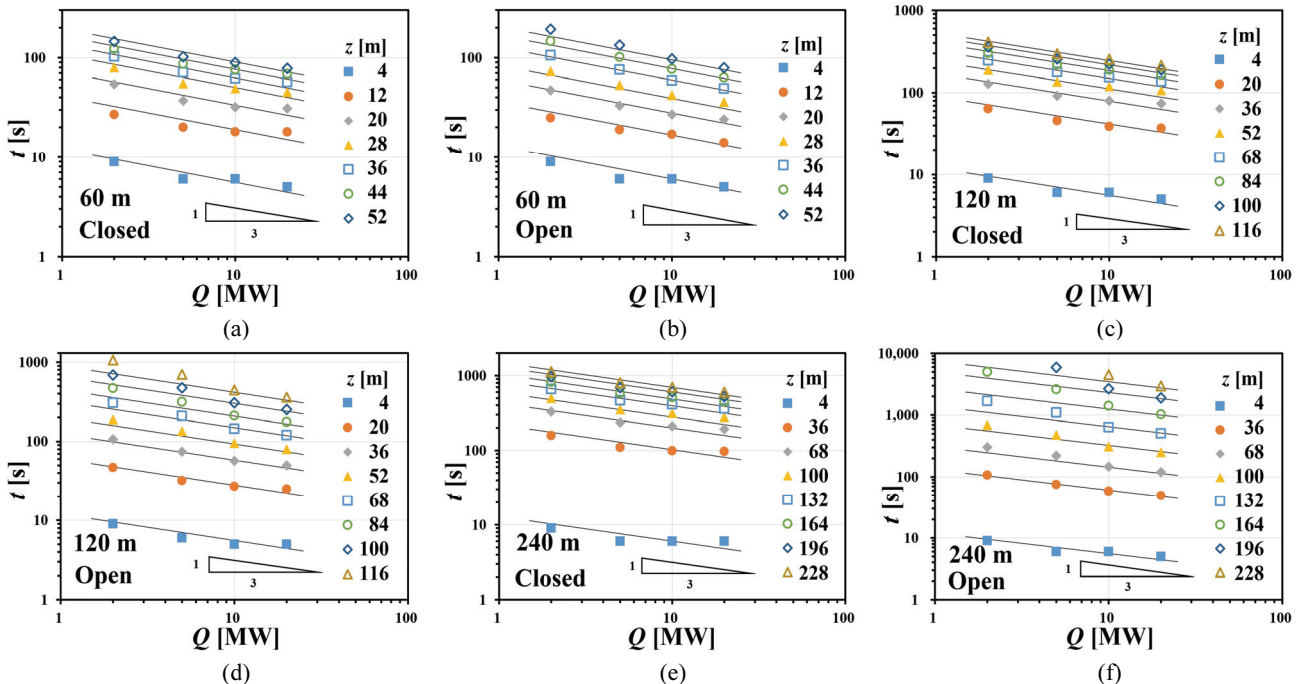


Fig. 10. Comparison of Smoke Rising Time by Height

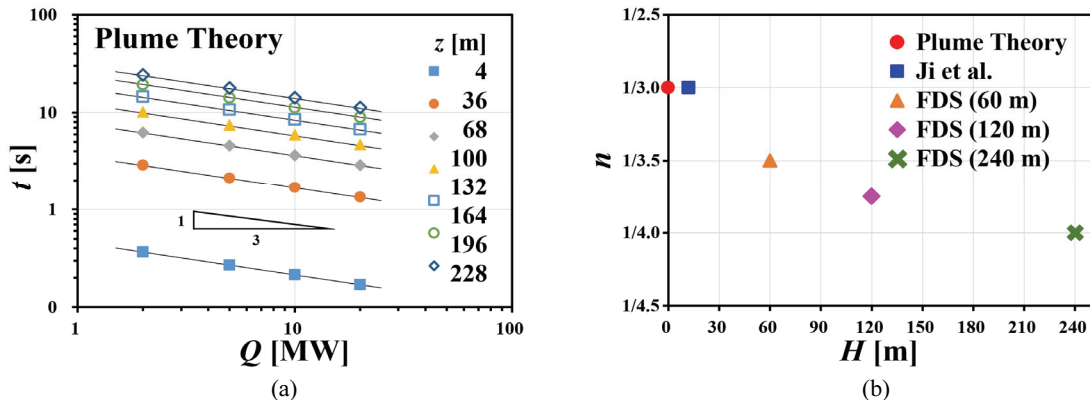


Fig. 11. Variation of Power Number with Building Height

선단의 상승시간은 발열량의 1/3.5 지수 승에 반비례하여 감소하는 것을 확인할 수 있으나, 계단실과 연결된 중간층의 배기구가 모두 개방될 경우에는 높은 층으로 올라갈수록 이 규칙을 따르지 않고 더 오랜 시간이 걸리는 것을 Fig. 10(b)를 통해 확인할 수 있다. 그리고 Figs. 10(c), 10(d)는 120 m의 계단실에서 연기 선단이 상승하는 시간을 분석한 그래프이다. 여기에서도 발열량이 증가함에 따라 연기 선단이 상승하는 시간은 발열량의 1/4 지수 승에 반비례하여 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 계단실과 연결된 중간층의 배기구가 모두 개방될 경우에는 높은 층으로 올라갈수록 시간이 오래 걸리며, 그 차이는 60 m의 계단실보다 큰 것으로 분석되었다. 이를 통해 계단실에서 연기의 선단이 상승하는 시간은 발열량의 지수 승에 반비례하여 변화하지만, 계단실의 전체 높이에 따라 지수 승의 값이 달라지며, 중간층의 배기구가 있을 경우에도 측정 높이에 따라 지수승의 값이 달라지는 것을 확인하였다.

개방된 공간에서 열원으로부터 발생한 뜨거운 플룸이 자연 부력에 의해 수직으로 상승하며 확산하는 현상은 Yarin (2012)에 의해 이론화 되었고, 이 plume jet theory를 이용하여 개방된 공간에서 플룸의 상승 시간을 Fig. 11(a)와 같이 산출하였다. 정해진 발열량에 대하여 높이에 따른 유속을 적분하여 특정 높이(z)에 대한 플룸의 상승 시간을 분석하였으며, 개방된 공간에서 자연 부력에 의해 수직으로 상승하는 뜨거운 플룸의 상승 시간은 발열량의 1/3 지수 승에 반비례하여 감소하는 것을 확인하였다.

plume jet theory에 의한 플룸의 상승 시간과 Ji et al. (2013)의 1/3 축소 계단모형 실험에 의한 뜨거운 플룸의 상승 시간 및 FDS의 수치해석 결과에 의한 Figs. 9(a), 9(c)의 결과를 Fig. 11과 같이 계단실의 높이에 대한 지수승의 변화를 비교하였다. 계단실의 높이에 비례하여 뜨거운 플룸의 상승시간은 증가하게 되는데, 그 관계는 달라진다.

4. 결론

본 연구에서는 그 도시의 랜드마크인 초고층건축물에서

실물크기의 계단실에서 발생한 화재연의 수직 상승 현상을 분석하기 위해 FDS로 모델링하여 수치해석 하였다. 수치해석을 통해 발열량의 영향과 중간층 환기량에 의한 영향 및 연기 선단의 수직 상승 시간에 대하여 분석하였다. 추가적으로 갇힌 계단실 내부에서 수직상승하는 플룸의 특성을 McCaffrey (1979)의 empirical line을 사용하여 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

계단실의 높이 변화, 열원의 발열량 크기 변화, 계단실과 연결된 환기구의 면적변화에 대하여 계단실 내부를 수직 상승하는 뜨거운 플룸의 이동 및 확산 현상을 분석하였는데, 온도 T 의 예측의 결과는 동일 높이에서 McCaffrey의 empirical line의 온도 값에 약 1/4 정도 되는 값으로 예측되었고, 수직 상승 유속 w 의 예측 결과는 동일 높이에서 McCaffrey의 empirical line의 유속 값에 약 1/6 정도의 값으로 예측되었다.

또한, FDS를 사용하여 동일한 크기의 계단실에 대해 발열량 및 계단실의 환기 조건이 달라짐에 따라 연기의 선단의 접촉면이 계단실 내부에서 상승하는 시간을 분석하였는데, 계단실의 문이 모두 닫혀 있을 경우에는 Eq. (2)의 수식으로 연기의 선단의 접촉면이 상승하는 시간을 예측할 수 있으며, 계단실 문이 모두 열려 있을 경우에는 위의 경험식 Eq. (3)을 통해 연기의 선단의 접촉면이 상승하는 시간을 예측할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 실용화형 융합연구단 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: QLT-CRC-18-02-KICT).

References

- Chen, Y., Zhou, X., Fu, Z., Zhang, T., Cao, B., and Yang, L. (2016). Vertical temperature distributions in ventilation shafts during a fire. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 79, pp. 118-125.

- Cooper, L.Y. (1998). Simulating smoke movement through long vertical shafts in zone-type compartment fire models. *Fire Safety Journal*, Vol. 31, No. 2, pp. 85-99.
- Harish, R., and Venkatasubbaiah, K. (2013). Transport phenomena of turbulent fire spread through compartment connected to vertical shaft in tall building. *Fire Safety Journal*, Vol. 61, pp. 160-174.
- Ji, J., Li, L.J., Shi, W.X., Fan, C.G., and Sun, J.H. (2013). Experimental investigation on the rising characteristics of the fire-induced buoyant plume in stairwells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 64, pp. 193-201.
- Ji, J., Li, M., Gao, Z., Li, Y., Shi, W., and Sun, J. (2016). Experimental investigation of combustion characteristics under different ventilation conditions in a compartment connected to a stairwell. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 101, pp. 390-401.
- Ji, J., Wan, H., Li, Y., Li, K., and Sun, J. (2015). Influence of relative location of two openings on fire and smoke behaviors in stairwell with a compartment. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 89, pp. 23-33.
- McCaffrey, B.J. (1979). *Purely buoyant diffusion flames: Some experimental results*. NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards, Washington, D.C., USA.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., and Overholt, K. (2013a). *Fire dynamics simulator - User's guide*. NIST Special Publication 1019, 6th Edition, National Institute of Standards and Technology.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., and Overholt, K. (2013b). *Fire dynamics simulator Technical reference guide Volume 1: Mathematical model*. NIST Special Publication 1018, 6th Edition, National Institute of Standards and Technology.
- Qi, D., Wang, L., and Zmeureanu, R. (2014). An analytical model of heat and mass transfer through non-adiabatic high-rise shafts during fires. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 72, pp. 585-594.
- Quintiere, J.G. (2002). Fire behavior in building compartments. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 1, pp. 181-193.
- Tanaka, T., Fujita, T., and Yamaguchi, J. (2000). Investigation into rise time of buoyant fire plume fronts. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, Vol. 2, No. 1, pp. 14-25.
- Yarin, L.P. (2012). *The Pi-Theorem: Applications to fluid mechanics and heat and mass transfer*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Zhang, J., Ji, J., Huo, R., Yuan, H., and Yang, R. (2006). A comparison of simulation and experiment on stack effect in long vertical shaft. *Journal of Fire Sciences*, Vol. 24, No. 2, pp. 121-135.
- Zhang, J., Lu, W., 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	January 3, 2020
Revised	January 6, 2020
Accepted	February 25, 2020