다중이용시설 내 계단실에 의해 수직 상승하는 플룸에 대한 모형실험 및 수치해석적 연구

Experimental and Numerical Study on the Plume Rising in Stairwell of Buildings

김두영* · 김정엽** · 안찬솔***

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

Abstract

In recent years, it has been observed that when a fire occurs in a multi-use facility, a toxic fire smoke rapidly rises through the vertical shaft and spreads due to the chimney effect and hot buoyancy. Generally, the fire smoke spreads rapidly through a number of evacuation passages installed for safe evacuation, which adversely affects an emergency situation. Due to the lack of this knowledge among the occupants, the majority of the occupants are evacuated using the stairwells, getting suffocated by poisonous smoke and suffering serious injuries. The present study considered the fire smoke spreading vertically through the stairwell. For this purpose, the power of the heat source and the area of the ventilation windows connected to the stairwell were modified, and the movement and diffusion of the hot plume rising vertically in the stairwell were observed. For the experiment, a 1/20 scaled-down stairwell model was employed, and the temperature 'T' and the vertical velocity 'w' of the hot plume rising inside the stairwell were measured using a 60 W-180 W heat source power. Numerical analysis was performed using FDS under similar conditions, and the results were compared with the experimental results.

Key words : Multi-use Facility, Scaled Down Stairwell Model, Buoyant Plum, CFD

요 지

최근에 많이 건설된 다중이용시설에서 화재가 발생하면 높은 높이의 수직공간에서 굴뚝효과와 뜨거운 플룸에 의하여 유독한 화재연이 천장방향으로 빠르게 이동한다. 피난시 안전한 대피를 위하여 설치된 다수의 피난통로 중에서 대표적인 계단실에 화재연이 유입되어 위급상황에 악영향을 미친다. 그래서 이러한 화재의 위험성을 모르는 대다수의 피난자가 계단실을 이용하여 대피하면 유독한 화재연에 질식하여 심각한 인명피해가 야기된다. 본 연구는 계단실을 통해 수직으로 확산하는 화재연의 이동 현상을 관찰하고자 열원의 발열량 크기와 계단실과 연결된 환기구의 면적을 변화시키면서 계단실의 내부에서 수직으로 상승하는 뜨거운 플룸의 이동 및 확산 현상을 관찰하였다. 그리고 이를 위해 1/20 크기의 축소 계단모형을 제작하였고 발열량이 60 W~180 W일 경우에 대해 계단실 내부에서 수직으로 상승하는 뜨거운 플룸의 온도 T와 수직 상승 유속 w를 측정하였다. 그리고 축소 계단 모형과 동일한 조건으로 FDS를 사용해 수치해석을 진행하였고 그 결과를 실험의 결과와 비교하여 분석하였다.

핵심용어 : 다중이용시설, 계단모형실험, 열부력, CFD

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

Member, Post Doc., Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 연구위원(E-mail: jykim1@kict.re.kr)

Member, Research Fellow, Fire Research Center, 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. 서 론

비약적인 경제발전으로 인하여 국내 대도시에는 멀티플렉스, 초고층건축물과 같은 불특정 다수의 사람들이 다양한 목적으로 사용하는 다중이용시설이 많이 건설되었다. 큰 규모의 다중이용시설 내부에는 환기 및 공조시스템과 이동수단(엘리베이터와 계단실 등)의 목적으로 높은 층고를 가진 다수의 수직공간이 구획되었다. 지진과 같은 자연재해로 내부에서 의외의 화재가 발생하는 경우에는 가연물에 의해 생성된 유독한 화재연은 굴뚝효과에 의하여 뜨거운 플룸의 형태로 내부밀도와 온도차이로 상부천장으로 빠르게 상승한다. 위급한 재난상황에서 피난자의 안전하고 인명피해를 최소화하는 최적의 대피계획을 수립하는 것은 중요하며, 구획된 수직공간에서 화재 플룸의 이동 및 확산하는 현상을 이해하는 것이 반드시 필요하다.

그래서 위급한 화재상황에서 효율적인 피난계획을 세울 때 건축물 계단실 모형실험과 수치해석을 수행하여 계단실 수직공간에서 온도와 수직방향 유속분포를 비교 분석하였다. 피난상황에 가장 치명적인 화재연을 효율적으로 제어 및 관리하고자 하며, 화재연의 수직확산속도와 연기상승시간 등의 예측정보는 재난상황을 제어하는 관리자에게 피난자의 대피경로 및 대피계획에 관한 중요한 정보를 제공할 수 있다.

국내외 연구자들이 다양한 건축물에서 발생된 화재연의 수직 방향 유동과 환기조건에 따른 모형실험과 수치해석인 선행연구를 수행하였다. 건축물과 같이 제한된 수직공간 안에서 화재연의 이동 및 확산 현상에 대하여 Zukoski (1976)는 구조물에서 연기의 움직임을 계산하기 위한 몇가지 간단한 방법을 제시하였고, 이후 Papanicolaou and List (1988)는 체계적인 실험을 통해 수직난류 부력제트류에 관한 현상이 연구되었다. 한편 Kim and Jaluria (1998)는 화재에 의해 생성된 연기 및 고온 가스가 수직공간에서 확산하는 현상에 대한 기본적인 물리적 프로세스 및 메커니즘을 해명하였고, Harish and Venkatasubbaiah (2013), Ji et al. (2015), Chen et al. (2016), Ji et al. (2016) 등이 수직공간의 환기 조건에 대한 자세한 연구를 진행하였다. 최근에 Ahn et al. (2018)과 Ahn, Bang et al. (2019)와 Ahn, Park et al. (2019)은 일련의 연구를 통해 다양한 수직공간에 대해 이론식과 실험 및 수치해석적인 방법으로 모형이 닫힌 열린 경우에 플룸의 상승 메커니즘을 연구하였다.

그리고 건축물 내부에서 모형계단을 제작하여 화재실험과 CFD에 대한 선행연구를 하였다. 멀티 존에서 화재 발생시 연기 이동을 연구하기 위해 CONTAM97R을 이용한 수치해석과 1/3 규모로 제작된 계단실의 실험(Qi et al., 2015)을 수행하였으며, 수직공간의 개방 상태에 따라 기류패턴 및 열전달 현상이 변화하는 모습을 관찰하기 위해 Mercier and Jaluria (1999)는 축소모형을 사용하여 실험하고 연구하였다.

Sun et al. (2011)은 6층 규모의 실제계단을 이용한 실험결과와 수치해석의 결과와 비교하였고, Ji et al. (2013)이 1/3 규모의 계단을 이용하여 화염 플룸의 상승시간에 대한 상세한 연구를 진행하였다. Shi et al. (2014)은 12층 규모의 계단 실험을 통해 스택효과와 난류혼합의 연기 이동 메커니즘을 연구하였으며, Li et al. (2014)은 축소 모형을 이용하여 중립면에 대한 실험적 관찰을 수행하였다.

이번 연구에서는 다중이용시설에서 화재가 발생하였을 때 생성된 뜨거운 플룸은 수직공간에서 유속변화와 온도확산을 통하여 수직방향으로 상승한다. 그리고 이를 규명하기 위해 국내 건축물 계단실 대상으로 1/20 크기의 12층 축소모형을 제작하였고, 열원의 발열량이 60 W~180 W일 경우에 4가지 시나리오와 환기구의 면적 변화에 따른 7가지 시나리오에 대해 계단실 내부에서 수직으로 상승하는 뜨거운 플룸의 온도 T와 수직 상승 유속 w를 각 층의 대표지점에서 측정하였다. 추가적으로 60 W와 180 W일 경우에 축소계단모형과 동일한 조건으로 FDS를 사용해 수치해석을 수행하였고 그 결과를 모형실험의 측정결과와 대조값과 비교하여 온도확산과 유속분포를 분석하였다.

하지만, 본 연구는 피난계단실로 수직확산하는 화재연기의 특성을 공학적으로 관찰 및 분석한 내용으로, 연돌효과와 제연설비의 연동에 의한 연계성은 배제하였는데 그 이유는 자연 부력에 의해 수직상승하는 화재연기의 운동량에 비해 연돌효과 및 제연설비가 가동됨에 따라 발생하는 유속의 운동량이 훨씬 지배적이기 때문이며, 연구된 내용은 화재 발생시에 제연설비의 부재 또는 작동실패와 같은 현실적인 상황을 고려하여 연기확산의 예측을 위해 필요한 정보를 제공한다.

2. 다중이용시설 내 계단모형 실험

축소 계단모형은 두께가 5 mm인 투명 아크릴 판재로 만들었으며 크기는 $0.47 \times 0.16 \times 1.92 \text{ m}^3$ 이고, 한 층의 높이가 0.16 m로 총 12층으로 구성되어 있다. 계단실의 크기는 $0.16 \times 0.16 \times 1.92 \text{ m}^3$ 이고, 각 층의 윗면과 아랫면은 $0.11 \times 0.16 \text{ m}^2$ 의 개구부와 연결되어 있어 12개 층의 계단실이 하나의 수직공간을 구성하고 있다. 그리고 Fig. 1과 같이 각 층마다 계단실 옆으로 Room B와 Room A가 차례로 접해 있는데, Room A는 실제의 건축물의 복도 또는 거실을 모사하여 만들었으며 크기는 $0.16 \times 0.16 \times 1.92 \text{ m}^3$ 이다. Room B는 실제의 건축물에서 복도와 계단실의 사이에 위치하여, 화재시 가압을 통해 복도에서 발생한 화재연이 계단실로 침입하는 것을 방지하도록 설계된 전실을 모사하여 만들었으며, 크기는 $0.15 \times 0.16 \times 1.92 \text{ m}^3$ 이다. 1층의 Room A의 바닥면에 열원을 설치하여 뜨거운 플룸이 발생할 수 있도록 설계하였고, Room A와 Room B 및 계단실 사이의 벽면에는 크기가 $0.05 \times 0.1 \text{ m}^2$ 인 문을 만들어 Room A에서

Fig. 1. (a) Detailed Illustration of a Building Prototype Used in the Experiment. (b) A Snapshot of the Prototype. Temperature and Velocity Sensors are Inserted Inside the Stairwell Column. (c) The Sealed Window Attached to Room A

발생한 뜨거운 플룸이 계단실로 흘러 들어갈 수 있도록 하였다. 그리고 2층부터 12층까지 Room A의 외벽과 Room B 및 계단실 사이의 벽면에는 개폐가 가능한 문을 설치하여 환기 조건을 변경할 수 있도록 하였다.

열원으로 사용된 코일은 전기로 가열되며, 전체 지름은 0.05 m이고 총 높이는 0.2 m이며, 코일의 상단이 1층 Room A의 바닥 면 높이와 일치하도록 개구부의 중앙에 위치시킨 후, 실험의 순서에 따라 가변 AC 전압조정기를 조절하여 실험에 필요한 발열량을 맞추었다.

실험은 1층의 Room A에서 열원에 의해 발생한 뜨거운 플룸이 Room B를 거쳐 계단실로 침투한 후 수직으로 상승하여 12층의 계단실 천장면의 개구부로 빠져 나가는 과정을 재현하였고, 이때 계측은 발열량이 변함에 따라 12개 층의 계단실 중앙에서 온도 T 와 수직 상승하는 유속 w 의 변화를 측정하였다. 계단실 중앙의 온도 T 및 수직 유속 w 를 계측하기 위해 Almemo FVAD 35 TH4Kx (Ahlborn, German)을 사용하였는데, 1층 계단실의 바닥면으로부터 높이 0.08 m 지점에 첫번째 thermos-anemometer를 설치하였고, 수직하는 위 방향으로 0.16 m간격으로 총 12개의 thermos-anemometer

를 설치하여, 계단실 내부에서 중앙 지점에 대한 온도 T 및 수직 유속 w 의 변화가 동시에 계측하였다.

3. 모형실험 및 수치해석 결과비교

1/20 축소 계단모형에서 4가지의 발열 조건을 다르게 사용하였고, 연결된 환기구의 면적을 변화시키면서 7가지의 실험이 수행하였다. 각각의 발열량에 따른 계단실 내부의 온도 T 와 유속 w 의 변화를 동시에 측정하였다. 그리고 모형 실험과 동일한 조건으로 수치해석 모델링을 하고 FDS를 사용해 시뮬레이션 결과를 축소 계단모형 실험의 결과와 비교하였다.

3.1 FDS 개요 및 수치해석 조건

본 연구 계단모형실험에서 사용한 FDS ver. 6.7.0은 미국 NIST의 BFRG그룹에서 개발한 공개용 소프트웨어이다. 난류모델은 LES 모델을 사용하였으며, FDS 입력조건으로 WALE모델을 사용하였다. 경계조건으로 계단실 벽면은 no-slip condition을 적용하였고, solid로 들어온 열에너지는 전도와 대류를 통해 반대편의 대기로 열전달 되도록 설정하였다. 발열량과 계측위치, 주변 대기조건, 문의 open 조건 등은 축소모형실험의 조건과 동일하게 적용하였다.

3.2 열원의 발열량의 크기에 대한 모형실험(2-12층 창문 closed)

열원의 발열량의 영향을 분석하기 위해 축소 계단모형 실험에서는 발열량을 60, 100, 140, 180 W로 설정하여 이 4가지 시나리오에 대한 실험을 수행하였고, 각 층의 계단실 중앙에서 온도 T 및 수직 상승 유속 w 의 변화를 측정하였다. 그리고 본 실험에서 사용한 발열량은 축소모형실험에서 계측기로 측정할 수 있는 최소 발열량과 아크릴모형체의 열변형을 방지할 수 있는 최대 발열량을 기준으로 설정하였다. 그 이유는 화재실험에서는 일반적인 유체연구에서 사용되는 상사의 법칙을 적용하는 것이 불가능하기 때문에, 먼저 축소모형실험과 이에 대한 FDS를 통한 수치해석적 검증을 통해 계단모형에 대한 FDS의 예측성능을 확보하고, 이후 실험으로는 확인이 불가능한 일반화재급(kW-MW)의 열방출율에 대하여 FDS를 통해 간접적으로 계단실의 연기확산 현상을 관찰할 수 있을 것이다.

한 가지 시나리오에 따른 실험을 수행할 때마다 약 120분 동안 전기식 가열코일의 발열량 안정과 축소 계단모형 내부의 대류 및 열전달 현상을 안정시킨 후, 온도 T 및 수직 유속 w 의 상태를 10분간 계측하여 평균값을 산출하였다. 실험의 전 과정은 대기압 상태의 무풍실에서 진행되었고, 측정 당시의 기온은 20 °C에 습도는 30% 내외였다.

FDS를 사용한 수치해석에서는 축소 계단모형 실험과는 달리, 발열량을 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 kW로 높게 설정하여 이

4가지의 시나리오에 대한 수치해석을 수행하였다. 연기확산 경향을 예측함으로써 실험과 시뮬레이션의 연기확산 경향이 일치하고 있음을 확인하였고, 각 층의 계단실 중앙에서 온도 T 와 수직 상승 유속 w 의 변화를 분석하였다. 또한 일반적인 건축물 화재에 비해 상대적으로 낮은 열원의 발열량을 사용하였기 때문에 계단실과 같이 복잡한 구조물을 관통하는 뜨거운 플룸의 난류확산 메커니즘이 정확하게 구현되지 못한 것으로 추정된다. FDS를 통한 수치해석에서도 실제와 같이 벽체를 통한 열전달을 고려하고 있으므로 실험과 마찬가지로 플룸의 밀도증가와 이에 대한 영향을 수치해석에 고려하였다.

Fig. 2는 발열량의 영향을 분석한 결과로써, Figs. 2(a), 2(b)는 축소 계단모형 실험의 60, 100, 140, 180 W에 대한 발열량 실험의 결과이고, Figs. 2(c), 2(d)는 FDS로 수치해석한 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 kW에 대한 발열량 수치해석의 결과를

보여주고 있다.

계단실 중앙의 온도 T 의 경우, 축소 계단모형 실험의 결과인 Fig. 2(a)와 FDS의 수치해석 결과인 Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이, 발열량이 증가할수록 1층에서 생성된 뜨거운 플룸의 초기 온도는 비례적으로 높은 온도에서 시작하고, 위층 부분으로 뜨거운 플룸이 이동할수록 플룸의 온도는 대기의 온도에 근접하며 매끄럽게 감소하는 것으로 확인할 수 있다.

수직 상승 유속 w 의 경우, 열원에서 발생한 뜨거운 플룸이 계단실로 유입되고, 초기에 계단의 구조물에 유동저항을 받아 불안정했던 유동이 계단의 경사면을 따라 상승하면서 점차 안정화 되어 유속이 급격히 상승하지만, 2~3층 이상에서는 뜨거운 플룸의 온도가 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 2~3층 이상에서 플룸의 온도 저하로 인해 밀도와 압력에 변화가 발생하면서 지속적인 계단의

Fig. 2. The Effect of Heating Power (or Fire Size, Q) on (a) Experimental T and (b) w , Numerical (c) T and (d) w . (e) Scaled Experimental w is Compared With Sun et al. (2011) Data. (f) Scaled Numerical w is Compared With Sun et al. (2011) Data. Note That All Windows Are “Closed”

유동 저항을 받아 수직상승 모멘텀이 급격히 소실되었기 때문인 것으로 추정된다.

축소 계단모형 실험의 결과인 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 1층에서 생성된 뜨거운 플룸이 계단실로 유입된 후 수직으로 상승하면서 2층에서 급격히 수직 상승 유속이 증가하지만 3층부터 12층까지 뜨거운 플룸이 수직 이동하면서 유속이 서서히 감소하게 되는데, 층별로 진동하며 감소하는 모습을 확인할 수 있다. 이와 동일하게 FDS의 수치해석 결과인 Fig. 2(d)에서도 발열량이 증가할수록 1층에서 생성된 초기 뜨거운 플룸의 수직 상승 유속 값이 비례하여 커지는 것을 확인할 수 있으며, 2층에서 수직 상승 유속이 급격히 증가하였다가 뜨거운 플룸이 위층으로 이동하면서 뜨거운 플룸의 수직 상승 유속이 서서히 감소한다. 여기에서도 축소 계단모형 실험의 결과와 동일하게 층별로 진동하며 유속이 감소하는 현상을 확인할 수 있으며, 이를 통해 모델 검증에서 계단실 상부의 수직 상승 유속을 크게 예측하였다. 대체적으로 FDS를 통한 난류 예측은 실제보다 난류확산을 느리게 예측하고, 이에 따른 유속은 과도하게 예측하는 경향이 나타난다. 이와 같은 경향은 발열량이 낮아수록 강해지며, 이것은 FDS에서 사용하고 있는 난류모델의 특성으로 추정된다.

Fig. 2(e)는 Sun et al. (2011)이 실험크기의 축소 계단실의 내부에서 연기 플룸의 수직 상승 유속을 실험한 결과 Fig. 2(b)의 실험결과를 비교한 그림이며, Fig. 2(f)는 Sun et al. (2011)의 수치해석 결과와 Fig. 2(d)의 FDS 수치해석 결과를 비교한 그림이다. 이들 두 그림에서 열원으로부터 계단실로 유입된 뜨거운 플룸의 수직상승 유속이 1~3층에서 급격히 상승하다가 3층 이상에서는 서서히 감소하는 경향을 동일하게 확인할 수 있다. 그리고 Figs. 2(e), 2(f)에서 각 경우 별로 $w/Q^{1/5}$ 의 분포 범위가 차이 나는 이유는 뜨거운 플룸의 수직 상승 유동이 enclosed된 유동이기 때문이며, 유동이 수직 상승하는 enclosed된 공간의 단면적과 연관되기 때문이다.

3.3 계단실과 연결된 환기구의 면적에 대한 모형 실험

축소 계단모형에서 각 층의 Room A와 Room B에 설치된

문을 개방함으로써, 중간층의 환기 조건에 따라 계단실 내부를 관통하는 뜨거운 플룸의 변화를 측정하였다. 실험은 Table 1과 같이 층별로 문의 개폐를 조합하여 7가지의 실험 시나리오(S1~S7)를 계획하였고, 각 시나리오 별로 계단실(1층~12층) 중앙의 온도 T 및 수직 상승 유속 w의 변화를 측정하여 그 결과를 비교하였다.

3.3.1 2~12층 문을 닫아둔 경우 모형실험 분석

7가지 시나리오에 따른 각각의 계단실과 연결된 환기구의 면적의 영향을 비교하기 위하여 열원의 발열량이 60 W와 180 W일 때 2~12층의 모든 문이 닫힐 경우에 대하여 모형실험을 수행하였다.

Fig. 3은 열원의 발열량이 60 W와 180 W일 때, 각 층의 계단실 중앙에서 온도 T와 수직 상승 유속 w를 축소 계단모형 실험에서 측정하고 FDS를 이용해 수치해석한 결과의 비교 그림이다. Fig. 3(a)는 계단실 중앙에서 온도 T의 변화를 보여주는 그림으로, 축소 계단모형 실험의 경우 180 W일 때 70 °C에서 24 °C까지, 60 W일 때 50 °C에서 20 °C까지 매끄럽게 온도가 감소하고 있으며, FDS의 분석결과에서도 180 W일 때 90 °C에서 24 °C까지, 60 W일 때 45 °C에서 20 °C까지 매끄럽게 온도가 감소하여, 실험의 결과 수치해석의 결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

하지만, 수직 상승 유속 w의 변화를 보여주는 Fig. 3(b)의 그림에서는 축소 계단모형 실험의 경우 180 W일 때 0.24 m/s에서 0.35 m/s까지 증가하였다가 0.19 m/s까지 유속이 층별로 진동하며 감소하는 경향을 보인다. 60 W일 때 0.16 m/s에서 0.22 m/s까지 증가하였다가 0.12 m/s까지 유속이 층별로 진동하며 감소한 반면, FDS의 분석결과에서는 180 W일 때 0.28 m/s에서 0.35 m/s까지 증가하였다가 0.3 m/s의 유속이 유지되었다. 60 W일 때 0.14 m/s에서 0.22 m/s까지 증가하였다가 0.2 m/s의 유속이 유지되어서, 뜨거운 플룸의 초기 유속은 축소 계단모형 실험의 결과와 잘 일치한다. 하지만 뜨거운 플룸이 상층부로 수직 이동할수록 축소 계단모형의 실험 결과보다 약간 높게 예측하고 있음을 볼 수 있으며, 이것은 앞에서 언급했듯이 FDS에서 사용하고 있는 난류모

Table 1. Test Case for Effect of Door Open

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S 1	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S 2	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X
S 3	X	X	X	X	X	X	X	O	X	X	X	X
S 4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X
S 5	X	O	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X
S 6	X	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O
S 7	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

※O: Open; X: Close

Fig. 3. Comparison between Experimental Data and FDS Results for Smoke (a) Temperature, T , and (b) Velocity, w at Steady State When All Windows Are “Closed”

Fig. 4. Smoke Field Distribution Comparison for $Q = 60$ W (left) and 180 W (right). The Smoke Distributions of (a) Velocity, w , (b) Temperature, T , (c) Density, ρ , and (d) Pressure, P , at Changing Elevation, z , When All Windows Are “Closed”

텔의 특성으로 판단된다.

Fig. 4는 FDS를 이용한 수치해석의 결과로, 열원의 발열량이 60 W와 180 W일 때, 수직 상승 유속 w 와 온도 T , 공기 밀도 ρ 및 내부 압력 P 의 등고선을 보여주는 축방향 종단면도

이다. 수직 상승 유속 w 의 변화를 보여주는 유속 그림을 통해, 2층에서 12층까지 각 층별로 동일한 패턴의 유동이 유속의 변화 없이 반복되고 있음을 확인할 수 있다. 온도 T 의 변화를 보여주는 온도 그림의 경우, 뜨거운 플룸이

위층 부분으로 이동할수록 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 계단실의 구조물과 상승하는 플룸 간의 열전달 현상을 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 공기 밀도 ρ 의 변화를 보여주는 공기 밀도 그림의 경우, 열원에 의해 부피가 팽창되어 밀도가 낮아진 공기가 계단실을 통과하며 상승하는 과정에서 계단실의 구조물과 열전달이 발생하고, 이로 인해 위층 부분으로 올라갈수록 대기압의 공기 밀도 수준으로 회복되고 있음을 확인할 수 있다. 내부 압력 P 의 변화를 보여주는 압력 그림의 경우, 열원으로부터 상승 모멘텀을 갖고 유입되는 뜨거운 플룸에 의해 높은 압력이 형성되고, 계단실을 통과하여 상층부로 이동하면서 점차 대기압 수준으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 열원에서 발생한 뜨거운 플룸이 축소 계단모형의 내부에서 수직상승하는 모습을 연기로 가시화하여 찍은 사진(Figs. 5(a), 5(b))과 FDS의 시뮬레이션 결과(Figs. 5(c), 5(d))를 비교하여 보여주는 그림이다. Figs. 5(a), 5(c)는 발열량이 60 W인 경우에 대한 FDS의 시뮬레이션 결과와 축소 계단모형에서 연기로 플룸을 가시화한 그림으로, 시간의 경과에 따라 플룸의 상승 속도가 유사하게 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 5(b), 5(d)는 발열량이 180 W인 경우를 보여주는 그림으로, FDS 시뮬레이션의 결과인 Fig.

5(b)에서는 시간에 비례하여 플룸이 일정한 속도로 상승하고 있으나 축소 계단모형의 실험에서는 연기가 위층 부분으로 상승할수록 상승 속도가 감소하고 있는 것을 Fig. 5(d)를 통해 확인할 수 있다. 축소 계단모형의 실험에서 연기가 위층 부분으로 상승할수록 상승 속도가 감소하고 있는 것을 Fig. 5(d)를 통해 확인할 수 있으며, 이것은 계단실과 연결된 전실문을 통해 유입된 외부공기와의 혼합과 외기와 접한 벽면으로의 열손실 등에 의해 플룸의 온도가 낮아지고 밀도가 증가한 것이 원인일 것으로 판단된다.

3.3.2 2, 5, 8, 11층 문 하나만 열어둔 경우 모형실험

Fig. 6은 시나리오 1~4에 관한 모형실험의 결과로써, 각 시나리오 별로 축소 계단모형에서 해당되는 층의 문이 개방되었을 때, 중간층의 환기조건의 변화에 대한 뜨거운 플룸의 변화를 측정된 결과이다. 시나리오 별로 축소 계단모형에서 문이 개방되는 층은 2, 5, 8, 11층이며, 이때 층별로 계단실의 중앙에서 온도 T 와 수직 상승 유속 w 의 값을 측정하고 그 결과를 비교하였다.

Figs. 6(a)와 6(c)는 발열량이 60 W와 180 W일 때, 층별로 계단실 중앙의 온도 T 를 측정된 결과로써, 전체 층중에 어느 한 층의 문이 개방되는 것은 계단실 내부의 뜨거운

Fig. 5. Transient Distribution of the Rising Smoke for (a) FDS at $Q = 60$ W, (b) FDS at $Q = 180$ W, (c) Experiment at $Q = 60$ W, and (d) Experiment at $Q = 180$ W When All Windows Are Closed

Fig. 6. Effect of Open Windows at Various Elevations for Case 1, 2, 3, and 4. The Rising Smoke (a) T at $Q = 60$ W, (b) w at $Q = 60$ W, (c) T at $Q = 180$ W, and (d) w at $Q = 180$ W. Note That Only One Window is “Open”

플룸의 온도 변화에 크게 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

반면, Figs. 6(b)와 6(d)는 발열량이 60 W와 180 W일 때, 층별로 계단실 중앙의 수직 상승 유속 w 를 측정된 결과로써, 발열량이 60 W의 경우에는 문이 개방된 층을 포함하여 그 위층에서 측정되는 수직 상승 유속 w 가 소폭 감소하는 경향을 보이고 있으며, 발열량이 180 W의 경우에는 문이 개방된 층의 위층부터 측정되는 수직 상승 유속 w 가 소폭 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 측정 결과는 개방된 중간층의 문으로 뜨거운 플룸의 유량이 일부분 배출되고, 이로 인해 계단실 내부에 남아있는 뜨거운 플룸의 수직 상승 모멘텀이 감소한 것이 원인일 것으로 추정된다.

3.3.3 전체 환기구가 열려있는 경우 모형실험

Fig. 7은 시나리오 5~7에 관한 결과로써, 각 시나리오 별로 축소 계단모형에서 해당되는 층의 문이 개방되었을 때, 중간층의 환기 조건의 변화에 대한 뜨거운 플룸의 변화를 측정된 결과이다. 시나리오 5는 축소 계단모형에서 2~6층까

지의 문이 개방되고, 시나리오 6은 축소 계단모형에서 7~12층까지의 문이 개방되며, 시나리오 7은 축소 계단모형에서 2~12층까지의 문이 개방된다. 그리고 각 층별로 계단실의 중앙에서 온도 T 와 수직 상승 유속 w 의 값을 측정하고 그 결과를 비교하였다.

Fig. 7(a)는 발열량이 60 W에 대한 뜨거운 플룸의 온도를 각 층별로 측정된 결과로, 시나리오 5와 시나리오 6의 경우에는 뜨거운 플룸의 온도 변화가 거의 없었으며, 시나리오 7의 경우에만 2 °C 정도 감소하였다. Fig. 7(c)는 발열량이 180 W에 대한 뜨거운 플룸의 온도를 각 층별로 측정된 결과로, 시나리오 5~7에서 모두 뜨거운 플룸의 온도가 5 °C 정도 감소한 것으로 측정되었다. 뜨거운 플룸의 온도가 감소한 이유는 뜨거운 플룸이 계단실을 수직 상승 이동하면서 개방된 문을 통해 많은 양의 뜨거운 플룸이 외부로 유출되고, 이에 상응한 외부의 차가운 공기가 유입되어, 계단실의 뜨거운 플룸과 섞였기 때문으로 추정된다.

Fig. 7(b)는 발열량이 60 W에 대한 뜨거운 플룸의 수직 유속을 각 층별로 측정된 결과로, 시나리오 5의 경우 뜨거운

Fig. 7. Effect of Open Windows at Various Elevations for Case 5, 6, and 7. The Rising Smoke (a) T at Q = 60 W, (b) w at Q = 60 W, (c) T at Q = 180 W, and (d) w at Q = 180 W. Note That Only One Window is “Open”

플룸의 수직 상승 유속이 약간 감소 하기는 하였지만 거의 변화가 없었다. 시나리오 6의 경우에는 뜨거운 플룸의 유속이 7층부터 급격히 감소하여 9층 이상에서는 뜨거운 플룸의 수직 상승 유속이 0.1 m/s 이하로 감소한 것으로 측정되었다. 시나리오 7의 경우에는 4층까지 뜨거운 플룸의 수직 상승 유속의 변화가 없었지만 5층 이상에서 급격히 감소하여 6층 이상에서는 뜨거운 플룸의 수직 상승 유속이 0.1 m/s 이하로 감소한 것으로 측정되었다.

그리고 Fig. 7(d)는 발열량이 180 W에 대한 뜨거운 플룸의 수직 유속을 각 층별로 측정된 결과로, 시나리오 5의 경우 뜨거운 플룸의 수직 상승 유속이 약간 감소 하기는 하였지만 거의 변화가 없었다. 시나리오 6의 경우에는 뜨거운 플룸의 유속이 2층에서 0.39 m/s까지 급격히 상승하였다가 5층부터 급격히 감소하여 10층 이상에서는 뜨거운 플룸의 수직 상승 유속이 0.1 m/s 이하로 감소한 것으로 측정되었다. 시나리오 7의 경우에는 뜨거운 플룸의 수직 상승 유속이 2층에서 0.39 m/s까지 상승하였다가 5층 이상에서 서서히 감소하여 12층에서는 0.9 m/s까지 감소한 것으로 측정되었다.

Fig. 8은 시나리오 7에 대한 뜨거운 플룸의 수직 확산을 연기로 가시화한 축소 계단모형 실험과 FDS의 수치해석 결과를 비교한 그림이다.

Figs. 8(a), 8(c)는 발열량이 60 W인 경우에 대한 FDS의 수치해석 결과와 축소 계단모형에서 뜨거운 플룸을 가시화한 그림으로, 시간이 지남에 따라 1층에서 발생한 뜨거운 플룸이 계단실로 유입되어 위층으로 수직 확산하는 것을 볼 수 있다. 뜨거운 플룸이 높은 층으로 올라갈수록 확산의 속도가 느려지는 것을 두 가지 모두에서 확인할 수 있으나, FDS의 확산 예측 결과가 축소 계단모형 실험의 결과 보다 약간 느린 것을 확인할 수 있다.

또한, 발열량이 180 W인 Figs. 8(b), 8(d)의 경우에서도 동일한 현상이 관찰되지만 그 경향이 많이 완화되어 FDS의 시뮬레이션 결과가 축소 계단모형의 실험결과와 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다. 발열량이 낮을수록 FDS가 플룸의 수직 확산 속도를 느리게 예측하는 원인은 FDS가 사용하고 있는 난류모델의 특성에 의한 것으로 추정되며, 실제 크기의 계단실에 대한 해석에서는 높은 발열량을 사용하여 해석하

Fig. 8. Transient Distribution of the Rising Smoke for (a) FDS at $Q = 60$ W, (b) FDS at $Q = 180$ W, (c) Experiment at $Q = 60$ W, and (d) Experiment at $Q = 180$ W When All Windows Are “Open”

Fig. 9. Comparison between Experimental Data and FDS Results for Smoke (a) Temperature, T , and (b) Velocity, w at Steady State When All Windows Are “Open”

기 때문에 차이는 상당히 완화될 것으로 추정된다. Fig. 9는 상승유속 w 와 온도 T 에 대하여 실험의 결과와 FDS의 시뮬레이션 결과를 높이에 따라 비교한 그림이며, FDS에

의한 시뮬레이션의 해석값이 실험의 결과를 잘 예측하고 있음을 정량적으로 확인할 수 있다.

Fig. 10은 축소 계단모형 실험에서 시나리오 7을 가시화

Fig. 10. Time Variation Picture of Smoke Flow for the Case 7

한 그림으로 발열량이 180 W인 실험의 가시화 그림이다. 그림은 1층에서 발생한 뜨거운 플룸이 계단실로 유입된 후 수직으로 확산하고 있으며, 계단실과 연결된 문을 통해 뜨거운 플룸의 일부가 Room B와 Room A로 유입되어 천장면을 타고 수평으로 확산하는 모습을 보여주고 있다. 계단실과 연결된 문의 윗부분을 통해 뜨거운 플룸의 일부가 Room B로 유입되어 확산되고, 이렇게 Room B로 유입된 뜨거운 플룸은 천장면을 타고 반대편의 문을 통해 Room A로 유입되어 확산된 후, Room A의 천장면을 타고 반대편의 외부와 연결된 문을 통해 배출되는 것을 확인할 수 있다.

반면, 외부와 연결된 Room A 문의 아랫부분을 통해 차가운 외부의 공기가 유입되어 바닥면을 타고 확산되는데, 차가운 공기의 윗부분은 Room A의 상부에 있는 뜨거운 플룸과 섞이게 되고, 섞이지 않은 아랫부분의 공기는 Room A의 바닥면을 타고 Room B까지 유입되어 Room B의 상부에 있는 뜨거운 플룸과 다시 섞이게 된 후, 계단실과 연결된 문의 아랫부분을 통해 유입되는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 다중이용시설 내 계단실을 통해 수직으로 확산하는 화재연의 이동현상을 열원의 발열량 크기와 계단실과 연결된 환기구의 면적을 변화시키면서 계단실의 내부에서 수직으로 상승하는 뜨거운 플룸의 온도확산 및 기류유동을 관찰하였다. 1/20 크기의 축소 계단모형을 제작하였고 각각 발열량의 변화와 계단실에 연결된 환기구 면적의 변화에 따른 계단실 내부에서 수직으로 상승하는 뜨거운 플룸의 온도 T 와 수직 상승 유속 w 를 측정하였다. 그리고 축소계단 모형실험과 동일한 조건으로 FDS를 사용해 수치해석을 진행하였고 실험의 결과와 비교하여 분석하였다. 본 연구를

통해 피난계단과 연결된 전실문의 개방상태에 따라 화재연의 수직이동시간에 따른 차이를 분석하여, 피난자의 안전하고 최적화된 피난계획에 위급상황에 적용할 수 있다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 다중이용시설 내 계단실 모형실험을 통하여 열원의 발열량이 커질수록 뜨거운 플룸의 온도 T 와 수직 상승 유속 w 는 비례적으로 증가하였으며, 뜨거운 플룸의 온도 T 는 높은 층으로 올라 갈수록 매끄럽고 반비례하게 낮아지는 것을 확인하였고, 수직 상승 유속 w 는 높은 층으로 올라 갈수록 층별로 진동하며 감소하였는데, 발열량이 증가할수록 진동의 폭이 커지는 것을 관찰하였다.
- (2) 계단실에 연결된 환기구의 면적의 변화에 대한 플룸의 영향을 분석하기 위해 다양한 문의 조합으로 7 가지 환기 시나리오에 따라 실험을 개방하여 실험하였다. 하지만, 개방된 문으로 유출되는 정확한 환기량과 환기방향을 측정할 수 없는 한계점이 있다. 그리고 모형 실험 중에 개방된 환기구의 문의 수의 증가할수록 외부로 유출입되는 환기량도 비례적으로 증가하였다. 실험결과 뜨거운 플룸의 온도 T 는 계단실과 연결된 환기구의 크기 변화에 큰 영향을 받지 않았으나, 수직 상승 유속 w 는 환기구 크기의 작은 변화에도 매우 민감하게 변화하였다.
- (3) 위급한 화재 대피시 다중이용시설 내 계단실에서 뜨겁고 유독한 화재연의 효과적인 제어를 위한 방법으로 본 연구에서는 주로 모형실험에서 발열량의 영향과 중간층 환기량의 변화에 의한 영향을 분석하였다. 본 연구의 현장 실효성을 확보하기 위해 실제 건축물의 크기를 적용한 실물사이즈의 화재연구가 필요할 것으로 판단되며, 이를 통해 실제계단의 높이와 환기구의 개방여부에 따른 연기상승시간에 대한 수치해석적인 분석이 향후연구로 진행될 필요가 있다.

감사의 글

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

References

- Ahn, C.-S., Bang, B.-H., Kim, M.-W., James, S.C., Yarin, A.L., and Yoon, S.S. (2019). Theoretical, numerical, and experimental investigation of smoke dynamics in high-rise buildings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 135, pp. 604-613.
- Ahn, C.-S., Bang, B.-H., Kim, M.-W., Kim, T.-G., James,

- S.C., Yarin, A.L., and Yoon, S.S. (2018). Numerical investigation of smoke dynamics in unconfined and confined environments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, pp. 571-582.
- Ahn, C.-S., Park, C.-W., Kim, M.-W., Kim, T.-G., James, S.C., Yoon, Y., et al. (2019). Experimental and numerical investigation of smoke dynamics in vertical cylinders and open-air environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 135, pp. 985-995.
- 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.
- 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., Shi, W., Fan, C., and Sun, J. (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.
- Kim, S.-Y., and Jaluria, Y. (1998). Basic considerations in combined buoyancy-induced and forced flow in a vertical open shaft, *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, Vol. 34, No. 5, pp. 519-536.
- Li, L., Ji, J., Fan, C., Sun, J., Yuan, X., and Shi, W. (2014). Experimental investigation on the characteristics of buoyant plume movement in a stairwell with multiple openings. *Energy and Buildings*, Vol. 68, pp. 108-120.
- Mercier, G., and Jaluria, Y. (1999). Fire-induced flow of smoke and hot gases in open vertical enclosures. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 19, No. 2, pp. 77-84.
- Papanicolaou, P.N., and List, E.J. (1988). Investigations of round vertical turbulent buoyant jets. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 195, pp. 341-391.
- Qi, D., Wang, L., and Zmeureanu, R. (2015). Modeling smoke movement in shafts during high-rise fires by a multi-zone airflow and energy network program. *ASHRAE Transactions*, Vol. 121, No. 2, pp. 242-251.
- Shi, W., Ji, J., Sun, J., Lo, S., Li, L., and Yuan, X. (2014). Influence of fire power and window position on smoke movement mechanisms and temperature distribution in an emergency staircase. *Energy and Buildings*, Vol. 79, pp. 132-142.
- Sun, X., Hu, L., Chow, W., Xu, Y., and Li, F. (2011). A theoretical model to predict plume rise in shaft generated by growing compartment fire. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 910-920.
- Zukoski, E.E. (1976). *Prediction of smoke movement in buildings*. California Institute of Technology, Pasadena, California 91125.

Received	November 12, 2021
Revised	November 18, 2021
Accepted	November 29, 2021