수직 관통로 내 연기 확산에 미치는 벽효과에 관한 수치해석적 연구

Numerical Study of the Wall Effect on the Diffusion of Smoke in a Vertical Channel

안찬솔*

Ahn, Chan-sol*

Abstract

The study of column dynamics in high-rise buildings is a subject of interest for building engineers because of their safety implications. In this study, a numerical analysis is performed using Fire Dynamics Simulator considering the temperature, velocity, and pressure of vertically rising smoke in buildings of various sizes as a function of fire size. The numerical analysis results were analyzed and verified for confined and open systems. The results of this study show that as the building area decreased and the fire size increased, the buoyancy flow accelerated, and the total building temperature rose. The lower pressure of the building floor due to the smoke's buoyancy increased the vertical pressure gradient throughout the building. These findings can be used by design engineers to develop design safety guidelines.

Key words : Fire Dynamics Simulator, Buoyant Smoke Dynamics, High-rise Buildings, Wall Effects

요 지

고층 건물의 기둥 동역학에 대한 연구는 안전에 미치는 영향 때문에 건물 엔지니어에게 관심의 대상이 되는 연구 분야이다. 본 연구에서는 다양한 크기의 건물에서 발생하는 수직 상승하는 연기의 온도, 속도 및 압력을 화재 크기의 함수로 고려하여 FDS (Fire Dynamics Simulator)를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과는 제한(confined) 및 개방(open)된 시스템에 대한 분석과 검증에 수행하였다. 연구결과, 건물 면적이 감소하고 화재 규모가 커지면 부력에 의한 흐름이 가속되고 전체 건물 온도가 상승하였고, 부력 연기로 인한 건물 바닥의 낮은 압력은 건물 전체의 수직 압력 구배를 증가시켰다. 이러한 연구결과는 연기 역학 관련 설계 엔지니어가 설계 안전 지침을 개발하는 데 사용할 수 있다.

핵심용어 : FDS, 부력 연기 유동, 초고층 빌딩, 벽효과

1. 서 론

초고층 건축물의 저층에서 화재가 발생하였을 경우, 화재에서 발생한 유독한 연소가스가 엘리베이터 샤프트 및 계단실 같은 수직 관통로를 통해 수직으로 이동하여 상층에서 확산되어 제 2의 인명사고를 유발하는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 본 연구에서는 화재에 의한 플룸(plume)이 수직 관통로를 수직으로 이동할 때 발생하는 현상과, 여기에 샤프트

트의 벽면에 미치는 벽효과(wall effect)를 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 이용하여 수치해석적으로 분석했다. 이를 위해 일정한 발열량에서 형성되는 플룸이 다양한 크기의 단면적을 갖는 수직 관통로의 내부를 이동하면서 발생하는 현상과 이에 대한 샤프트 벽면의 영향을 수치해석적으로 분석하였고, 이를 실험값 및 이론값과 비교하였다. 또한 다양한 발열량의 경우에 대해서도 벽효과를 수치해석적으로 분석하고 그 결과를 비교하였다.

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 복합재난대응연구단 수석연구원(Tel: +82-31-369-0515, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: chansole@kict.re.kr)
Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Multi-Disaster Mitigation Research Group, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

자체유사 층류평면과 축대칭 제트이론은 Zeldovich (1937)에 의해 개발되었으며 이에 대한 Turner (1969)의 후속연구에 이어 Jaluria (1980)와 Yarin (2012)에 의해 부력 유도 유동의 일반적인 이론으로 알려지게 되었다. Prandtl 혼합 길이 이론의 틀에서 발견되는 자기유사 난류평면 및 축대칭 제트에 대한 자체 유사 솔루션도 사용할 수 있다 (Yarin, 2012). 1 층에 화재로 인한 고층 빌딩 위의 연기 전파의 경우 후자는 모델링 실험 노력을 위한 분석 모델 및 지침 개발에 최대 관심사이다.

자연 상승하는 플룸에 대한 실험적인 연구로써, Morton et al. (1956)은 Maintained and Instantaneous Sources로부터 방출되는 Turbulent Gravitational Convection을 실험한 바 있다. Conner (1967)는 Smoke-Stack Plume의 광학 특성 및 시각 효과를 이용하여 실험한 바 있다. McCaffrey (1979)는 순수하게 부력 확산하는 화염을 실험하였고 Baum et al. (1997)은 Fire 플룸을 3차원으로 시뮬레이션 하였다. Papanicolaou and List (1988)는 등근 형태의 Turbulent Buoyant Jet에 대한 실험을 수행하였고 Chen (1991)은 흐르는 주변 환경에서 Turbulent Buoyant Jet과 플룸에 대한 실험을 하였다. Shabbir and George (1994)는 등근 형태의 Turbulent Buoyant 플룸에 대한 실험을 수행한 바 있다. Sangras and Faeth (1999)는 Buoyant Turbulent Jet과 플룸에 대한 실험을 하였고 Kaminski et al. (2005)은 임의의 부력과 동반되는 Turbulent Entrainment에 대한 실험을 하였다. Carazzo et al. (2006)은 Turbulent Jet과 플룸의 자기 유사성에 관하여 연구하였고 Sun et al. (2006)은 산불모델을 이용하여 화염 플룸의 특성을 수치해석적으로 시뮬레이션하여 평가한 바 있다.

플룸의 상승시간과 관련한 실험으로는 Tanaka et al. (2000)이 Buoyant Fire 플룸 선단의 상승시간에 대한 실험을 수행하였고 Hu et al. (2004)은 Free Smoke 플룸 선단의 상승시간을 실제 규모의 실험과 Field Model 시뮬레이션 결과를 비교하였다. Ji et al. (2013)은 계단에서 화재에 의한 부력 플룸의 상승 특성에 관한 실험을 하였고 Lyu and Woods (2016)는 다공성 매체에 주입된 buoyant 플룸의 발전에 대한 실험을 수행하였다.

그 외에도 Cetegen and Kasper (1996) 및 Cetegen et al. (1998)은 부력이 있는 헬륨과 헬륨-공기 혼합물의 진동 특성에 관한 실험과 평면 Buoyant Plume의 안정성 및 진동 거동에 관한 실험을 하였고 Rooney and Linden (1997)은 강력하게 부양하는 플룸의 유사성 및 소규모 환기에 대한 영향성을 실험하였으며, Harrison (2001)은 Two-Phase의 Negatively Buoyant 플룸에 대한 실험을 하였다.

선행연구에서는 개방공간에서 Buoyancy에 의해 형성된 플룸이 수직으로 상승하는 현상에 대하여 이론적 모델을 제시하여 결과를 예측하였고 그 결과를 FDS의 수치해석 결과와 비교하여 검증하였다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 Buoyancy에 의해 자유롭게 수직으로 확산하는 플룸이 수직 관통로의

벽으로 인한 공간적인 제한을 받게 될 경우 관통로의 내부 벽이 수직 상승하는 플룸의 유동에 미치는 영향을 분석하기 위해 수직 관통로의 단면적을 변화하면서 수치해석적으로 분석하고 이를 통해 일반적인 관련성을 도출하고자 한다.

Fig. 1. Schematic of Hot Air Rising Because of Fire-induced Buoyancy

2. 이론 및 수치해석 모델

2.1 플룸 이론

Yarin (2012)에 따르면, 관심의 대상인 축 대칭 난류의 흐름을 지배하는 가장 중요한 매개 변수는 방출 된 Q_z 또는 그 대응 변수인 $Q_r = Q_z/(\rho c)$ 이다. 여기서 ρ 와 c 는 각각 일정한 기체 압력에서의 밀도 및 비열이다. 축 대칭 플룸은 다음의 관계가 성립한다.

$$Q_r = \int_0^{\infty} u(T - T_{\infty}) y dy, \quad (1)$$

여기서 u 는 플룸에서의 종 방향 속도성분, T 는 플룸에서의 온도 분포, T_{∞} 는 주변 기체의 온도, y 는 수직축으로부터 추정 된 임의의 플룸 단면에서의 반경 좌표이다. 따라서 Q_r (또는 Q_z)는 항상 입력 매개 변수가 된다.

상승하는 플룸을 따라 수직방향의 최대 속도는 V_{max} 이다. 난류의 축 방향 대칭성 플룸에서, V_{max} 는 다음과 같이 추정된다 [Yarin (2012), Eq. (6.111)].

$$V_{max}(z) = \left(\frac{\beta g Q_z}{\rho c z} \right)^{1/3} \quad (2)$$

여기서 β 는 가스 열팽창 계수이고 g 는 중력가속도이다. 유사하게, 플룸에서 수직 방향의 최대 온도는 다음과 같다 [Yarin (2012), Eq. (6.111)].

$$T_{max}(z) - T_{\infty} = \left(\frac{Q_z}{\rho c} \right)^{2/3} \frac{1}{(\beta g)^{1/3} z^{2/3}}. \quad (3)$$

샤프트의 중간에서 상승하는 플룸으로 공기가 유입되면

샤프트 내부의 체적 유량은 자연 플룸의 경우와 비슷한 방식으로 증가한다.

$$\dot{Q} = \int_0^{\infty} u r dr. \quad (4)$$

따라서 자기 유사 해법은 다음과 같이 된다.

$$\dot{Q} = \left(\frac{\beta g Q_z}{\rho c} \right)^{1/3} z^{2/3} \times \text{constant} \quad (5)$$

2.2 FDS (Fire Dynamics Simulator)

FDS는 저속(Ma < 0.3)에 적합한 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 한 계산식(McGrattan, 2000)으로, FDS의 유체 역학 모델은 화재로 인한 저속의 열 유동 연기 흐름을 해석하는데 적합하다. 난류는 대형 와류 시뮬레이션(LES) 모델을 사용하며 연소는 연료와 산소의 즉각적인 반응을 예상하는 혼합 분율 모델을 사용한다. 복사열 에너지 수송은 비 산란 회색 가스와 광대역 모델을 기반으로 한다. 지배 방정식은 Rehm and Baum (1978)에서와 같이 연속성, 농도 균형, 운동량과 에너지 균형, 그리고 이상 기체 상태 법칙을 포함한다.

3. 결과 및 결론

3.1 수치해석의 유효성 검증

본 연구에서는 McCaffrey (1979)가 그의 논문에서 가스버너를 이용하여 실험한 조건과 동일한 조건을 FDS로 모사하여 수치해석한 결과를 그의 경험식과 비교하였다.

$$\frac{u}{Q_z^{1/5}} = k \left(\frac{z}{Q_z^{2/5}} \right)^{\eta} \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{T_0}{2g} \left(\frac{k}{C} \right)^2 \left(\frac{z}{Q_z^{2/5}} \right)^{2\eta-1} \quad (7)$$

여기서 C 는 부력 상수, k 는 중심선 상관 계수이며, η 는 중심선 상관 관계의 지수이며, ΔT 는 온도차이다. 이러한 상수 및 계수는 Table 1에 요약되었다.

Table 1. Summary of the Centerline Data (McCaffrey, 1979)

	k	η	$\frac{z}{Q_z^{2/5}} \left[\frac{\text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1/5}} \right]$	C
Flame	$6.8 \left[\frac{\text{m}^{1/2}}{\text{s}} \right]$	1/2	< 0.08	0.9
Intermediate	$1.9 \left[\frac{\text{m}}{\text{s} \cdot \text{kg}^{1/5}} \right]$	0	0.08~0.2	0.9
Plume	$1.1 \left[\frac{\text{m}^{4/5}}{\text{s} \cdot \text{kg}^{1/5}} \right]$	-1/3	> 0.2	0.9

수치해석을 위해 14.4, 21.7, 33.0, 44.9, 57.5 kW의 5가지 발열량에 대하여 McCaffrey (1979)의 실험과 동일하게 모델링하였고, 초기조건과 경계조건 또한 동일하게 설정하였다. 수치해석을 위해 사용한 계산영역은 가로(x), 폭(y), 높이(z)가 2 m × 2 m × 2 m이다. 여기에 사용된 격자는 40 × 40 × 80개로써 x, y 축으로는 비등간격 격자를 사용하여 중심축에서는 최소 0.0026 m이고 계산영역의 경계와 접한 부분에서는 최대 0.138 m로 설정하였고 z축으로는 0.025 m로 등간격의 격자를 사용하였다. 계산영역의 6면은 모두 개방된 조건을 적용하였고 화원에서 방출되는 가스 연료의 유동 외에는 강제적인 유동조건을 적용하지 않았다. 발열원의 크기는 0.3 m²으로 설정하였다. FDS에서 난류해석을 위해 사용하는 LES 모델은 Verman의 모델을 사용하였고 대류 및 복사 열전달을 해석하였다. 온도와 수직 상승유속의 예측값은 화원의 중심로부터 수직으로 0.025 m 간격으로 81개 지점에 대해 해석된 결과 중 600초간의 시간평균값을 사용하여 Table 1의 경험값과 비교하였다(Fig. 2).

Fig. 2. Centerline (a) ΔT vs. z Scaled by $Q_z^{2/5}$; (b) u Scaled by $Q_z^{1/5}$ vs. z Scaled by $Q_z^{2/5}$

McCaffrey (1979)의 플룸에 관한 실험을 FDS로 모사하여 수치해석을 한 결과, Flame 영역과 Intermittent 영역에서는 온도를 다소 과잉 예측하는 경향이 있었고, 플룸 영역에서는 수직 상승유속을 과소 예측하는 경향이 보였으나 대체적으로 McCaffrey (1979)의 이론식을 잘 따르는 것으로 분석되었다. 이것은 FDS에서 사용하고 있는 연소방정식이 실제의 연소과정에서 발생하고 있는 복잡한 화학적 결합과정을 단순화하여 모델링한 것과 LES 난류모델의 특성으로 추정된다.

위 결과를 통해 초고층 건축물의 수직 관통로 내부에서 발생하는 플룸의 확산 현상을 해석하는 데에 FDS를 사용하여 충분히 신뢰성 있는 예측결과를 얻을 수 있음을 확인하였고, 이후에 다루어질 수직 관통로의 벽영향을 분석하는 데에도 FDS를 사용하였다.

3.2 실물크기의 벽효과 수치해석

고층 건축물 내부의 계단실이나 엘리베이터 이동로와 같은 수직 관통로를 통해 연기가 수직으로 이동을 하게 되는데, 이와 같은 현상을 유발하는 주요한 힘에 대하여 Drysdale (2011)은 다음과 같이 분류하고 있다.

- (a) 화원에 의해 직접 생성된 부력
- (b) 내부 및 외부 온도의 차이로 발생하는 부력
- (c) 외부 바람과 공기의 움직임의 영향
- (d) 건물 내의 공기조화 시스템

하지만 선행연구와 본 연구에서는 (a)만을 고려하여 연구를 진행하고 있으며, 따라서 (b)-(d)와 관련된 압력의 영향은 이번 연구내용에서 다루고 있지 않다. 그리고 연기가 수직 관통로의 내부에서 확산할 때 수직이동 현상에 영향을 미치는 요소로는 다음의 사항을 고려할 수 있다.

- (1) 화원의 크기
- (2) 수직 관통로의 단면적
- (3) 유입구와 유출구의 단면적
- (4) 수직 관통로 벽을 통한 열전달
- (5) 수직 관통로 벽의 표면 거칠기
- (6) 중간층에서의 유입 또는 유출 공기

위에 기술된 요소 외에도 많은 영향인자가 있으나, 본 연구에서는 (1)과 (2)에 의한 영향만을 고려하여 이 들간의 상관관계를 분석하고 일반화 하고자 한다.

벽효과를 조사하기 위하여 사용한 수치해석 계산영역의 크기는 가로(x), 세로(y), 높이(z)를 $40 \times 40 \times 100 \text{ m}^3$ 로 하였다. x와y 방향으로 각각 100개의 격자를 사용하였으며 화원이 위치한 중심에서 최소간격 0.04 m, 계산영역의 경계와 접한 부분에서 최대간격 1.00 m 까지 비등간격 격자를 사용하였고, z방향으로는 0.2 m의 간격으로 500개의 등간격 격자를 사용하여 모델링하였다. 해석 영역의 6면은 모두 개방된 상태로 설정하여 계산영역의 경계에서 물질이 자유로이 이동하도록 하였으나 강제적인 물질 이동은 없는 것으로 하였다. 초기 계산영역의 내부 및 외부로부터 유입되는 공기는 20°C , 1 atm의 표준대기상태를 사용하였으며, 수직 관통로의 벽면에서 발생하는 경계층을 계산하기 위해 Non-slip Condition에 Wall-Function을 적용하였다. 풀룸으로부터 벽으로 열전달을 방지하기 위해 벽에는 단열조건을 적용하였고 수직 관통로의 중간에서 공기 유입은 없는 것으로 가정하였다.

Fig. 3. 3D Computational Domain for Open-air System and Buildings with Cross-sectional Areas Ranging from 25~1,600 m^2 . The Building Height is was 100 m in All Cases, and the Heating Power is was $Q_z = 10 \text{ MW}$

첫번째 테스트에서는 수직 관통로의 정 사각단면적이 25, 100, 400, 1600 m^2 인 4가지 단면적(Fig. 3)에 대하여 수치해석을 진행하였고, 이 결과를 수직 관통로가 없이 개방된 경우와 비교하였다. 화원의 크기는 지름 0.67 m의 원형 열원을 설정하였고 화재의 강도는 10MW 화재로 설정하여 모델링하였다. 화원의 중심점을 기준으로 높이 1 m마다 온도, 수직 성분의 유속, 체적 유량, 압력을 측정하였고, 열원은 복사열 발열체를 사용하여 열전달만으로 부력 플룸이 생성되도록 하였다. 이것은 순수 플룸만을 고려한 2.1장의 이론식 결과와 비교하기 위함이며, 모든 예측값은 600초간의 시간평균값을 사용하여 이론값과 비교하였다.

Fig. 4. Centerlines (a) T , (b) u , (c) $\dot{Q}$, and (d) P as Functions of Building Size

Fig. 4(a)는 수직 관통로의 단면적 크기별로, 높이에 대한 중심선에서의 온도변화를 시간평균하여 2.1장의 이론식 예측값과 비교한 그래프이다. 수직 관통로의 단면적이 작아질수록 이론식보다 온도가 천천히 상승하다가 높이 16 m를 기점으로 급격히 상승하여 높이에 따른 온도차이가 적어지는 현상을 보이고 있다. 최대 온도상승은 단면적이 25 m^2 일 때 약 50°C 까지 상승하였다. Fig. 4(b)는 수직 관통로의 단면적 크기별로, 높이에 대한 중심선에서의 수직방향 유속변화를 이론식의 예측값과 비교하여 나타낸 그래프이다. 단면적에 반비례하여 중앙 수직상승 유속이 증가하고, 단면적이 작을수록 높이에 대한 유속의 변화가 감소하는 경향을 보이고 있다. 최대유속은 단면적이 25 m^2 일 때 약 13 m/s까지 상승하였다. Fig. 4(c)는 수직 관통로의 단면적 크기별로, 높이에 대한 체적유량 변화를 이론식의 예측값과 비교하여 나타낸 그래프이다. 체적유량은 단면적에 비례하여 증가하는 경향을 보이고 있으며 수직 관통로 내부에서 형성된 채널유동(channel flow)에 의해 높이에 상관없이 일정한 체적유량이 이동되고 있음을 보여주고 있다. Fig. 4(d)는 수직 관통로의 단면적 크기별로 높이에 대한 단면 중앙에서의 압력변화를 나타낸 그래프이다. 단면적이 작아질수록 화원

에서의 압력이 낮아지는 경향을 보이고 있으며 최저 압력은 단면적이 25 m²일 때 약 -62 Pa까지 감소하는 경향을 보였다. 이것은 화원에 의한 주변공기의 부피 팽창과 부력에 의한 공동화 현상 때문으로 추정된다.

Fig. 5. Lateral Profiles $u(y)$ for: (a) an open-air system and buildings with cross-sectional areas of (b) 1,600, (c) 400, and (d) 100 m²

Fig. 5는 각 수직 관통로의 특정 높이에서 생성되는 수직 성분의 유속을 시간평균하여 나타낸 그래프이다. 중심선에서 시작하여 수직 관통로의 벽면까지 y방향으로 갈수록 변화하는 수직 성분의 유속을 높이 별로 중첩하여 비교했는데, 단면적의 크기와는 무관하게 열원으로부터 수직으로 1 m 높이에서는 약 12 m/s의 상승 유속이 생성되는 것으로 분석되었다. Fig. 5(a)는 개방된 공간에서의 유속 변화를 나타낸 그림으로, 높이가 높아질수록 플룸의 반경이 커지면서 수직상승 유속이 감소하여 최상부에서는 약 5 m/s까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. Figs. 5(b)와 5(c)는 단면적 1600 m²와 400 m²에서 상승 유속의 변화를 나타낸 그림으로, 높이가 높아질수록 플룸의 반경이 커지면서 수직상승 유속이 감소하여 최상부에서는 각각 6 m/s, 7 m/s까지 감소하며 플룸의 외부에서도 약 1 m/s와 3 m/s의 수직 상승하는 균일유동(uniform flow)이 생성되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5(d)는 단면적 100 m²에서 상승 유속의 변화를 나타낸 그림으로, 높이 1 m에서 10 m 사이에서만 플룸이 생성되고 그 이상에서는 중심에서 약 11 m/s의 일정한 유속을 유지하다가 최상부에서 9 m/s로 감소하는 포물선 형태의 채널유동과 형성되어 있음을 확인할 수 있다.

3.3 화원 크기에 대한 벽효과 수치해석

본 장에서는 앞장에서 다루었던 5가지 경우의 수직 관통로 상단에 다양한 강도의 열원을 적용하여 벽효과를 수치해석적으로 분석하였다. 수치해석에 사용된 격자와 경계조건, 초기조건은 앞장에서 수행한 수치해석과 동일하게 사용하

였고, 열원의 지름을 변경하여 2 MW, 5 MW, 20 MW의 발열량에 대한 벽효과를 분석하여 10 MW의 결과와 함께 McCaffrey (1979)와 2.1장의 이론식 결과와 비교하였다.

Fig. 6. Effect of Fire Size in Buildings with Different Cross-sectional Areas (1,600, 400, 100, and 25 m²) on Plume Temperature T . The Analytical Solution and Numerical Simulations are Compared to McCaffrey's Empirical Fit (McCaffrey, 1979)

Fig. 6은 수직 관통로의 단면적 크기에 따라 중심선을 따라 변화하는 플룸의 온도와 높이의 상관관계를 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)는 2.1장과 McCaffrey (1979)의 이론값을 비교한 그림이다. Flame과 Intermittent 구간을 고려하지 않고 오직 플룸 만을 고려한 2.1장의 이론값과 McCaffrey (1979)의 플룸구간에 대한 이론값이 잘 일치함을 확인할 수 있다. 특히 2.1장의 이론식은 점열원(point heat source)의 개념을 사용하고 있기 때문에 높이가 0 m인 열원의 표면에서는 무한대의 온도값을 갖는다. Fig. 6(b)는 개방된 공간에서 발열량별 플룸의 온도변화를 나타내고 있으며, 플룸 구간에서 2.1장과 McCaffrey (1979)의 이론값이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 화염이 없이 복사열에 의해서 플룸이 생성된 것은 2.1장의 이론적 개념과 일치하지만, FDS 수치해석에서는 발열량에 비례하여 면적을 갖는 열원을 사용하고 있기 때문에 Flame과 Intermittent의 구간에서 2.1장의 이론값과 McCaffrey (1979)의 이론값의 중간값을 갖고 있는 것이 특징이다. Fig. 6(c)는 수직 관통로의 단면적이 1600m²일 때, 발열량 변화에 대한 온도변화를 나타낸 그림이며 Fig 6(b)와 유사한 결과를 보이고 있다.

개방된 공간에서의 온도변화와 비교하였을 때, 수직 관통로의 단면적이 감소할수록, 발열량의 변화에 대한 온도변화의

이탈이 점차 커지고 있음을 Figs. 6(c)~6(f)를 통해 확인할 수 있다. Figs. 6(c)~6(e)는 수직 관통로의 단면적이 각각 1600 m², 400 m², 100 m² 일때 FDS로 수치해석된 결과들이며, 발열량 변화에 따라 플룸의 중앙선을 따라 높이별 온도변화를 나타낸 그림이다. Fig. 6(b)의 변화와 유사하게 Flame 영역과 Plume 영역에서 $\Delta T \propto z^0$ 와 $\Delta T \propto z^{-5/3}$ 의 경향을 잘 따르고 있지만 발열량별로 Intermittent 영역에서 이탈이 발생하였고 수직 관통로의 단면적이 작아질수록 이탈의 크기도 커지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(f)에서는 모든 발열량에서 McCaffrey (1979)의 온도선도를 따르지 않고 온도가 변화없이 수직상승하게 되는데, 이는 발열원에 의해 발생한 플룸이 수직 관통로 내부에서 수직상승하는 채널유동을 형성하면서 충분히 발달된 난류 유동으로 발달했기 때문으로 추정된다. Fig. 6(f)에서 20 MW의 온도변화 선도가 5 MW, 10 MW의 선도보다 아래에 위치하고 2 MW의 선도와 거의 일치하는 현상을 보이고 있는데, 이것은 그래프에서 ΔT 를 표시할 때 높이 z 를 $Q^{2/5}$ 로 나누어주면서 보이는 발열량 Q 의 영향에 의한 것이며 실제의 데이터에서는 발열량이 증가할수록 ΔT 도 순차적으로 증하고 있음을 확인하였다.

개방된 공간에서의 온도변화와 비교하였을 때, 수직 관통로의 단면적이 감소할수록, 발열량의 변화에 대한 온도변화의 이탈이 점차 커지고 있으며, Flame 영역과 Plume 영역에서 $\Delta T \propto z^0$ 와 $\Delta T \propto z^{-5/3}$ 의 경향을 따르지 않고 $\Delta T \propto z$ 의 경향과 유사해 지고 있음을 Figs. 6(c)~6(f)를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 7. Effect of Fire Size in Buildings with Different Sizes (1,600, 400, 100, and 25 m²) on Plume Axial Velocities. The Analytical Solution and Numerical Simulations were Compared to McCaffrey's Empirical Fit (McCaffrey, 1979)

유속 $u/Q^{2/5}$ 의 경우 온도와 마찬가지로 플룸 만을 고려한 2.1장의 이론의 결과는 McCaffrey (1979)가 Flame영역과 Intermittent영역에서 제시한 유속선도와는 무관하고 오직 Plume영역에서 $u \propto z^{-1/3}$ 의 유속선도와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이것 역시 2.1장의 이론식은 점 발열원(point heat source) 개념을 사용하고 있으며 발열원의 표면에서는 무한대의 유속값을 갖기 때문이다. Fig. 7(b)는 개방된 공간에서 수치해석된 FDS의 결과이며 발열량별로 플룸의 중심선을 따라 높이별 수직상승 유속값의 변화를 보여주고 있다. 유속의 경우에도 McCaffrey (1979)가 Flame영역과 Intermittent영역에서 제시한 유속선도보다 과잉 예측 하지만 $u \propto z^{1/2}$ 의 경향을 따르고 있는 것이 특징이다. 여기서 FDS의 수치해석 결과가 Flame영역에서 2.1장의 이론식의 값을 따르지 못하는 이유는 온도의 경우와 같이, FDS의 수치해석에서는 고온 발열체를 이용하여 자연부력에 의한 플룸을 생성하고 있지만 수치해석에서는 발열원 표면에서의 유속이 0 m/s에서 시작하기 때문이다. 또한 FDS의 수치해석 결과가 McCaffrey (1979)가 Plume영역에서 제시한 유속선도보다 과잉 예측하는 이유는, McCaffrey (1979)의 실험에서는 발열원의 표면에서 가연성 가스가 제트분사 되면 수직상승 하는 과정에 연소현상을 진행하게 되므로 발열 에너지가 점진적으로 증가하게 되는 반면, FDS의 수치해석에서는 발열원 표면에서 총발열 에너지를 모두 갖고 수직상승 하기 때문에 강한 자연부력이 발생하여 Plume영역에서 실험의 경우보다 상대적으로 높은 수직 상승유속이 발생한 것으로 추정된다. Figs. 7(c)~7(e)는 수직 관통로의 단면적이 각각 1600 m², 400 m², 100 m²일 때 FDS로 수치해석된 결과들이며, 발열량별로 플룸 중앙의 중심선을 따라 높이별 수직상승 유속변화를 나타낸 그림들이다. 플룸의 전체 영역에서 Fig. 7(b)의 변화와 유사한 결과를 보이고 있지만 수직 관통로의 단면적이 감소할수록 이탈이 커지는 것을 확인할 수 있으며, Flame영역의 초기 상승유속은 거의 변함이 없지만 Intermittent영역과 Plume영역에서 상승유속이 크게 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 7(f)의 경우 발열량간의 이탈이 크게 증가하였고 Intermittent영역과 Plume영역에서 상승유속이 크게 증가하였는데, 이것은 발열원에 의해 생성된 플룸이 수직 관통로의 내부에서 수직상승하는 채널유동을 형성하였고 충분히 발달된 난류유동으로 발달하였기 때문으로 추정된다. Fig. 7(f)에서 20 MW의 유속변화 선도가 5 MW, 10 MW의 선도보다 아래에 위치하는 현상을 보이고 있는데, 이것은 그래프에서 유속을 표시할 때 높이 z 를 $Q^{2/5}$ 로 나누어 주면서 보이는 발열량 Q 의 영향에 의한 것이며 실제의 데이터에서는 발열량이 증가할수록 ΔT 도 순차적으로 증하고 있음을 확인하였다.

Figs. 7(c)~7(f)의 유속 변화를 Fig. 7(b)와 비교하였을 때, 수직 관통로의 단면적이 감소할수록, 발열량의 변화에 대한 유속변화의 이탈이 더욱 커지고 있음을 확인할 수 있으며

Flame 영역과 Plume 영역에서 $u \propto z^{1/2}$ 와 $u \propto z^{1/3}$ 의 경향을 따르지 않고 $u \propto z^0$ 의 경향과 유사해 지고 있음을 확인하였다.

Fig. 8은 발열원의 크기, 수직 관통로의 단면적 크기에 따라 측단면에서 표현된 특정 시간에서의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 분석된 모든 발열량의 경우에서 단면적의 크기가 1600 m²인 경우 개방된 공간에서의 풀룸과 매우 유사한 형상과 온도 분포로 풀룸이 생성되고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 단면적이 작아질수록, 발열량이 커질수록 수직 관통로의 최상부에서의 온도가 상승하고 있으며 100 °C 이상이 되는 풀룸의 고온 경계도 점차 높아지고 있음을 확인할 수 있다. 특히 20 MW에서 단면적이 25 m²인 경우, 중심선의 전체 높이에서 온도가 100 °C를 넘으며 약 70 m 이상에서는 수직 관통로 내부의 온도가 평균 60 °C 이상으로 유지되는 것을 확인할 수 있는데 이러한 현상을 통해 풀룸의 성장과 수직 관통로의 벽면과의 상호 작용에 의한 강한 온도의 확산 현상이 발생하고 있음을 추정할 수 있다.

Fig. 8. Temperature Fields for Each Building

Fig. 9는 발열원의 크기, 수직 관통로의 단면적 크기에 따라 측단면에서 표현된 특정 시간에서의 수직 유속 분포를

나타낸 그림이다. 분석된 모든 발열량의 경우에서 단면적의 크기가 1600 m²인 경우 개방된 공간에서의 풀룸과 매우 유사한 형상과 유속으로 풀룸이 생성되고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 단면적이 작아질수록, 발열량이 커질수록 풀룸 외부의 균일유동의 유속이 상승하고 있으며 풀룸 중심부에서의 유속이 10 m/s를 초과하는 부분이 점차 높아지고 있음을 확인할 수 있다. 특히 20 MW에서 단면적이 400 m² 이하인 경우, 낮은 높이에서 생성된 10 m/s 이상의 풀룸 중심부 유속이 최상부까지 유지되고 있음을 확인할 수 있는데 이러한 현상을 통해 풀룸의 성장과 수직 관통로의 벽면과의 상호 작용에 의한 난류성 채널유동이 성장하고 있음을 추정할 수 있다.

Fig. 9. Velocity Fields for Each Building

Fig. 10은 발열원의 크기, 수직 관통로의 단면적 크기에 따라 측단면에서 표현된 특정 시간에서의 압력분포를 나타낸 그림이다. 분석된 모든 발열량의 경우에서 단면적의 크기가 1600 m²인 경우 개방된 공간에서의 풀룸과 매우 유사한 형상과 압력 분포로 풀룸이 생성되고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 단면적이 작아질수록, 발열량이 커질수록 수직 관통로 의

최상부는 대기압을 유지하고 있으나 최하부의 압력이 단면적에 비례하여 낮아지는 경향을 확인할 수 있다. 특히 5 MW에서 단면적이 25 m²인 경우 최하부의 압력이 -60 Pa까지 낮아졌으며, 20 MW에서 단면적이 25 m²인 경우 최하부의 압력이 -96 Pa까지 낮아졌다. 이러한 현상의 원인은 열원에서 생성된 부력 유동에 의해 풀룸이 성장하고, 수직 관통로의 상부에서 벽면과 상호 작용을 하여 강한 난류성 채널유동이 성장하면서 최하부에는 강한 부압(negative pressure) 현상이 발생하였기 때문으로 추정된다.

Fig. 10. Pressure Fields for Each Building

4. 결 론

본 연구에서는 초고층 건축물의 저층에서 발생한 화재로 인해 유독한 연소가스가 엘리베이터 샤프트 및 계단실과 같은 수직 관통로를 통해 수직으로 이동하여 상층에서 확산되는 현상에 기인하여, 일정 발열량에서 형성되는 풀룸이 수직 관통로의 내부를 이동하면서 발생하는 현상과 이에 대한 수직 관통로의 벽영향을 Dynamics Simulator (FDS)를 이용하여 수치해석적으로 분석하였다. 이를 위해 McCaffrey (1979)

의 실험과 동일하게 FDS 모델을 제작하여 수치해석을 수행하였고, McCaffrey (1979)의 이론값과 비교하여 FDS의 수치해석 결과에 대한 신뢰성을 검증하였다.

본 연구의 전반부에서는 10 MW의 복사열 발열체로부터 형성된 풀룸이 다양한 크기의 단면적을 갖는 수직 관통로를 수직으로 이동하면서 발생하는 현상에 대하여 온도와 수직 상승 유속을 기준으로 비교하고 분석하였다. 단면적의 크기가 1600 m²인 경우 개방된 공간에서 발생하는 풀룸의 특성과 매우 유사함을 보였으며, 단면적이 작아 질수록 높이에 대한 온도, 수직상승 유속의 변화는 감소하였고 체적유량은 채널 유동의 특성을 갖음을 확인하였다.

후반부에서는 전반부에서 분석한 내용을 기본으로 하여 발열량을 2 MW, 5 MW, 20 MW의 세가지 경우로 확장 적용하여 수치해석을 수행하였고 그 결과를 Yarin (2012) 및 McCaffrey (1979)의 이론값과 비교하였다. 이들의 경우에서도 단면적의 크기가 1600 m²인 경우 개방된공간에서 발생하는 풀룸의 특성과 매우 유사함을 보였으며, 발열량이 클수록, 수직 관통로의 단면적 크기가 작을수록 완전히 발달(fully develop)된 채널유동이 빨리 형성됨을 확인하였다.

본 연구를 통해 수직 관통로의 내부를 수직으로 이동하는 풀룸의 특성과 벽효과에 의한 온도 및 수직상승 유속의 이탈 현상을 확인할 수 있었으나, 단면적의 크기와 벽효과의 정량적이고 일반적인 상관관계를 발견하지는 못했다. 이를 위해서는 단면 형상에 대한 변수의 체계적인 정립과 이론적인 고찰이 수행되어야 할 것으로 판단되며, 이것은 이후에 수행될 연구에서 다루어질 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국가과학기술연구회(NST)가 2018년 융합연구 사업으로 지원하고 복합재난대응연구단의 연구과제(No. CRC-16-02-KICT)로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Baum, H.R., McGrattan, K.B., and Rehm, R.G. (1997). Three dimensional simulations of fire plume dynamics. *Fire Safety Science*, Vol. 5, pp. 511-522.
- Carazzo, G., Kaminski, E., and Tait, S. (2006). The route to self-similarity in turbulent jets and plumes. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 547, pp. 137-148.
- Cetegen, B.M., Dong, Y., and Soteriou, M. (1998). Experiments on stability and oscillatory behavior of planar buoyant plumes. *Physics of Fluids*, Vol. 10, No. 7, pp. 1658-1665.
- Cetegen, B.M., and Kasper, K.D. (1996). Experiments on the oscillatory behavior of buoyant plumes of helium

- and helium-air mixtures. *Physics of Fluids*, Vol. 8, No. 11, pp. 2974-2984.
- Chen, H.-B. (1991). *Turbulent buoyant jets and plumes in flowing ambient environments*. Series Paper No. 3, Department of Civil Engineering, University of Aalborg, Denmark.
- Conner, W.D. and Hodkinson, J.R. (1967). *Optical properties and visual effects of smoke-stack plumes*. U.S. Public Health Service publication No. 999-AP-30, Cincinnati, OH: U.S. Public Health Service.
- Drysdale, D. (2011). *An introduction to fire dynamics* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Harrison, T.H. (2001). *Experimental studies of two-phase negatively buoyant plumes*. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Hu, L., Chow, W., Huo, R., Li, Y., and Wang, H. (2004). Comparison of rise time of free smoke plume front predicted by a field model with full-scale experiments. *Proceedings of the 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology*, International Association for Fire Safety Science (IAFSS), Daegu, Korea.
- Jaluria, Y. (1980). *Natural convection: Heat and mass transfer*. Oxford: Pergamon.
- 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.
- Kaminski, E., Tait, S., and Carazzo, G. (2005). Turbulent entrainment in jets with arbitrary buoyancy. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 526, pp. 361-376.
- Lyu, X., and Woods, A.W. (2016). Experimental insights on the development of buoyant plumes injected into a porous media. *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, No. 2, pp. 709-718.
- McCaffrey, B. (1979). *Purely buoyant diffusion flames: Some experimental results*. NBSIR 79-1910, Final Report, National Bureau of Standards.
- McGrattan, K.B., Baum, H.R., Rehm, R.G., Hamins, A., and Forney, G.P. (2000) *Fire dynamics simulator: Technical reference guide*. NISTIR 6467, National Institute of Standards and Technology.
- Morton, B., Taylor, G., and Turner, J. (1956). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 234, pp. 1-23.
- Papanicolaou, P.N., and List, E.J. (1988). Investigations of round vertical turbulent buoyant jets. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 195, pp. 341-391.
- Rehm, R., and Baum, H.R. (1978). The equations of motion for thermally driven, buoyant flows. *Journal of Research of the Nat. Bur. of Stand.*, Vol. 83, No. 3, pp. 297-308.
- Rooney, G., and Linden, P. (1997). Strongly buoyant plume similarity and 'small-fire' ventilation. *Fire safety Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 235-258.
- Sangras, R., and Faeth, G. (1999). Buoyant turbulent jets and plumes: III. Round turbulent nonbuoyant starting jets and puffs and buoyant starting plumes and thermals. Report No. GDL/GMF-99-03, National Institute Standard and Technology.
- Shabbir, A., and George, W.K. (1994). Experiments on a round turbulent buoyant plume. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 275, pp. 1-32.
- Sun, R., Jenkins, M.A., Krueger, S.K., Mell, W., and Charney, J.J. (2006). An evaluation of fire-plume properties simulated with the Fire Dynamics Simulator (FDS) and the Clark coupled wildfire model. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 36, No. 11, pp. 2894-2908.
- 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.
- Turner, J. (1969). Buoyant plumes and thermals. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 1, pp. 29-44.
- Yarin, L.P. (2012). *The Pi-theorem: Applications to fluid mechanics and heat and mass transfer*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Zeldovich, Y.B. (1937). Limiting laws of freely rising convection currents. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, Vol. 7, pp. 1463-1465.

Received	October 25, 2018
Revised	October 26, 2018
Accepted	November 5, 2018