수직 실린더 내부에서의 연기 확산에 대한 실험적 연구

Experimental Study for Smoke Diffusion in a Vertical Cylinder

안찬솔*

Ahn, Chan-sol*

Abstract

This experimental study was conducted to investigate the spread of fire smoke through the vertical penetration passage of a skyscraper. Vertical cylinders were used to observe the smoke diffusion phenomenon in the vertical direction, and the conditions of the limited heat source were constructed. Experimental measurements of the vertical diffusion of the plume generated from the pyrolysis source with natural buoyancy was carried out, and the effect of the cylinder wall was observed. The results were compared with the results of the theoretical equations and numerical analysis and analyzed. It was observed that the plume limited by the vertical cylinder tends to diffuse to the periphery while puffing, similar to the open plume at the initial stage generated in the heat source. However, it was observed that the pipe flow developed while moving upward. In addition, as the cross-sectional area decreased owing to the wall surface of the cylinder, and as the calorific value of the heat source increased, the pipe flow developed rapidly.

Key words : Fire Dynamics Simulator, Buoyant Smoke Diffusivity, High-rise Buildings, Vertical cylinder, Confined Environments

요 지

본 연구에서는 초고층빌딩의 수직 관통로를 통해 화재 연기가 확산되는 현상에 대해 관심을 갖고 연구하였다. 이러한 현상을 관찰하기 위해 수직으로 세워진 실린더로 제한된 발열원을 준비하고, 여기에서 발생한 플룸이 자연 부력으로 수직 확산하는 현상을 실험적으로 관찰하였고 그에 따른 실린더 벽면의 영향도 관찰하였다. 그리고 그 결과를 이론식 및 수치해석의 결과와 비교하고 분석하였다. 실험결과, 실린더에 의해 제한된 플룸이 발열원에서 발생된 초기에는 개방된 플룸과 유사하게 puffing을 하면서 상부로 확산하는 경향을 보이지만, 상부로 상승 이동하면서 파이프유동(pipe flow)로 발전하는 것을 관찰하였다. 그리고 이때 실린더 벽면의 영향으로 실린더의 단면적이 작아질수록, 발열원의 발열량이 커질수록 플룸의 수직상승 확산속도가 빠르게 진행되는 경향을 보였다.

핵심용어 : FDS, 부력 연기 확산, 초고층 빌딩, 수직 실린더, 제한 공간

1. 서 론

초고층 건축물에는 다양한 목적으로 수직 관통로가 설계되고 만들어져 있으며, 목적과 용도에 따라 그 크기와 형태도 다양하다. 대표적인 예로 엘리베이터 샤프트와 계단실이 있는데, 이들은 건물 이용자 또는 재실자의 층간 이동을 목적으로 만들어 졌지만, 건축물 내부에 화재가 발생했을 경우에는 화재로부터 발생한 독성가스가 이동하는 경로로 이용되어, 화재가 발생한 층의 재실자 뿐만 아니라 상층부에

머물러 있는 재실자의 건강과 생명까지 위협하는 상황으로 전개되는 경우가 발생한다. 이러한 사실 때문에 최근에는 초고층 건축물의 수직 관통로와 같이 제한된 공간의 내부로 화재 플룸이 유입 되었을 때, 그 움직임을 예측하는 일이 매우 의미 있게 되었다.

제한된 공간에서 부력 플룸의 기본적인 움직임을 분석한 선행연구로써, Meroney and Yang (1971)은 단순한 육면체구조에 대한 유동 및 확산 하향류(diffusion downwind)를 풍동 측정하였고, Zukoski (1976)은 구조물 또는 구조물의 일부를

*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)

통과하는 연기의 움직임을 계산하는 몇가지 방법을 제안하였다. 이 방법들은 연소 생성물로부터 재실자를 보호하거나 연소생성물의 이동을 제한하고 소방관이 화재에 접근할 수 있도록 화재의 흐름을 변경하기 위한 방법으로 제시한 바가 있다.

수직 관통로에 대한 연구는 공간의 중형비가 수직 방향으로 크게 차이나는 공간을 대상으로 하며, 수직 관통로와 인접한 구획에서 화재가 발생하고, 이 화재에서 발생한 플룸이 수직 관통로의 하부와 연결된 개방된 면적을 통해 유입되어 수직 확산이 진행되는 플룸의 이동 현상에 대해 분석하고 있다. Cooper (1998)는 전통적인 Zone-type의 구획 화재 모델링이 엘리베이터 샤프트나 배기 샤프트와 같이 큰 중형비를 갖는 공간에 대한 준 안정기의 부력 기둥(quasi-steady-buoyant-plume)의 분석에 부적합함을 지적하고, 이러한 한계를 극복하기 위해 모델 방정식을 개발하였다. 한편 Kim and Jaluria (1998)는 화재에 의해 생성된 연기 및 고온 가스가 수직 관통로에서 확산하는 현상에 대한 기본 물리적 프로세스 및 메커니즘에 대해 해명하였고, Mercier and Jaluria (1999)는 열린 수직 공간의 흐름 및 열전달 현상을 축소모델을 사용하여 실험하였다. 또한 Quintiere (2002)는 성층화를 고려한 1구역 구획 기상 모델에 대해 근사수학공식을 이용하여 화재의 중요한 물리적 특징을 설명하였다. 한편 Zhang et al. (2006)은 긴 세로축의 스택효과를 서로 다른 전산유체 역학 모델을 사용해 수치 예측하고 실험에서 얻은 실험 데이터와 결과를 비교하였다. Xiao et al. (2008)은 개방된 수직 샤프트에서 고온의 가스가 이동하는 문제에 대해 유동장 및 열장(thermal fields)을 지배하는 매개변수를 Grashof, Reynolds, Biot Number로 추정하고 이들에 대한 영향조사를 수행하였다. 그리고 Zhang et al. (2008)은 건물 화재 시 샤프트 공간 내부의 중립면의 위치를 예측하기 위해 샤프트의 공간을 화재 구역과 내부공간으로 나눈 모델을 제시하였고 Harish and Venkatasubbaiah (2013)는 수직 관통로와 연결된 구획에서 발생한 화재의 성장 및 확산을 이해하기 위해 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용한 Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식과 4단계 Runge-Kutta 방법으로 구획과 샤프트, 수직으로 배열된 다중 통풍구, 천장 통풍구의 영향을 관찰하였다. Qi et al. (2014)은 환기 조건에 따라 일정한 연기 유량을 갖거나 스택효과가 작용하고 있는 고층 샤프트에서의 연기 운동을 분석하기 위한 이론 모델을 개발하였고 멀티존에서 화재 발생시 연기 이동을 연구하기 위해 CONTAM97R을 이용한 수치적 해석과 1/3규모로 제작된 계단 샤프트의 실험을 수행(Qi et al., 2015)하였으며 수직 샤프트 내부의 연기 온도 프로파일, 유속 및 압력 분포의 결합 모델을 기반으로 온도분포 및 관련 NPL의 위치를 계산(Qi et al., 2017)하였다.

제한된 액체의 난류 부력 플룸에 대한 연구도 몇가지 진행되었는데, Papanicolaou (1984)은 액체의 축대칭 수직 난류 부력 제트의 인입(entrainment) 및 혼합과정과 제트에서

플룸으로 전이(transition)되는 과정을 연구하였는데, 이를 위해 레이저 유도 형광측정장비와 레이저-도플러 속도계를 사용하여 난류류 부력 제트의 축방향과 방사방향의 속도 및 농도를 측정하였다. 또한 Papanicolaou and List (1988)는 선행연구와 동일한 장비를 사용하여 액체에서 난류 부력 제트를 측정하였는데, 난류를 차원 분석과 자기 유사성에 비례하여 평균 흐름을 예측하였고, 부력 생성 난류는 제트 난류보다 2배의 동반기류(tracer)를 운반한다는 것을 밝혔다. 그리고 Chu and Baines (1989)는 수직으로 평행한 두개의 벽 사이로 소금물을 분사하여 벽 사이로 확산되는 난류 유동을 생성하는 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 수직 실린더 내부에서 발열원로부터 발생한 부력 플룸의 온도와 수직유속이 수직 실린더의 벽면과의 상호 작용하면서 변화하는 현상을 측정한다. 이를 위해 발열량의 변화에 대한 플룸의 온도 및 수직유속의 변화를 높이에 따라 측정하고, 이와 동시에 수직 실린더의 단면적을 변화하여 플룸의 중심에서 수직 실린더 벽면까지의 거리가 변함에 따라 플룸의 온도와 수직유속이 받는 영향을 조사한다. 실험에 사용할 발열원은 전기 열선을 사용하고, 발열량을 변화하기 위해 전기 열선에 공급되는 전압의 크기를 조절하기 위해 AC Voltage Regulator를 연결한다. 수직 실린더 내부에서 수직으로 상승하는 부력 플룸의 온도와 수직유속을 측정하기 위해 열유속계(thermo-anemometer)를 플룸의 중심축을 따라 높이별로 설치하는데, 높은 온도구역과 낮은 온도구역으로 나누어 각 영역대에 적합한 성능의 열유속계를 설치하고 시간에 대한 변화를 측정한다.

플룸의 중심에서 수직 실린더 벽면까지의 거리를 변경하기 위해 지름이 다른 수직 실린더를 사용하고, 수직 실린더 내부에서 발생한 부력 플룸의 유동 특성과 비교하기 위해 개방공간에서 발생한 부력 플룸의 온도와 수직유속을 측정한다. Fig. 1은 발열량의 변화에 따라 제한된 플룸의 온도와 수직유속을 측정하기 위해 구성한 실험 개략도(Schematic)이다.

Fig. 1. Schematic of Confined Plume Rising

기존에 수행되었던 수직 관통로 내부의 부력 플룸에 관한 연구들은 Grashof, Reynolds, Biot Number 등을 이용하여 정상상태(steady-state)에서 내부 유동장을 예측하거나, 실험을 통해 환기조건에 따른 플룸 선단의 상승속도, 온도 및 중립면의 위치 등을 관찰하였다. 그러나 본 연구에서는 수직 관통로의 형상이 변함에 따라 난류 부력 플룸이 관통로 벽면과 상호작용하여 변화되는 과정을 관찰하고, 이를 이론식과 수치해석적 결과와 비교하여 확인하고자 한다.

2. 이론 및 실험 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]).

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

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 실험 수행

축소모형실험은 세 가지 모양의 실린더와 개방 상태에 대하여 실험이 진행되었고, 발열원의 발열량이 변화할 때 실린더의 중심축을 따라 높이 별로 온도 T 와 수직 상승하는 유속 u 를 측정하였다.

실린더는 투명 아크릴 판재를 사용하였는데 두께가 0.008 m이고 높이가 2.0 m이며 지름이 각각 0.14, 0.5, 1.0 m인 세 가지 형태로 제작하였고, 실린더의 윗면과 아랫면은 개방된 상태로 만들었다. 실린더의 벽면에는 별도의 표면처리를 하지 않았고, 센서를 끼워 넣기 위한 구멍을 만들어 플룸 중심의 온도 T 와 수직 유속 u 를 측정할 수 있도록 하였다. 높이가 0 ~ 1.0 m인 구간은 0.1 m 간격으로, 높이가 1.0 ~ 2.0 m인 구간은 0.2 m 간격으로 총 16개의 구멍을 만들었다.

발열원으로 사용된 전기열선의 전체 지름은 0.03 m이고 총 높이는 0.04 m이며, 이를 실린더 아래쪽의 개방된 입구 중심에 위치시킨 후, 실험의 순서에 따라 가변 AC 전압 조절기를 조절하여 32, 144, 220W의 세가지 발열량에 맞추었다.

온도 및 수직 유속을 측정하기 위해 두가지 종류의 thermos-anemometer를 사용하였다. 첫번째는 발열원에서 발생한 고온의 플룸을 측정하기 위해 Kanomax Model 0204를 사용하였는데, 실린더의 높이가 0.0~0.2 m인 구간에 3개의 thermos-anemometer를 0.1 m 간격으로 설치하여 플룸의 온도 T 와 수직 유속 u 를 동시에 측정하였다. 두번째는 Almemo FVAD 35 TH5Kx를 사용하였는데, 실린더의 높이가 0.3~1.0 m인 구간에는 8개의 thermos-anemometer를 0.1 m 간격으로 설치하였고, 높이가 1.2~2.0 m 인 구간에는 5개의 thermos-anemometer를 0.2 m 간격으로 설치하여 plume 중앙의 온도 T 와 수직 유속 u 를 동시에 측정하였다.

온도 T 및 수직 유속 u 의 측정은 세가지 크기의 실린더 및 개방 공간 실험에 대해, 발열량을 0, 32, 144, 220W로 변화시키면서 총 16 경우에 대한 실험을 1주기로 실시하였고, 총 3 주기로 반복해 측정하였다. 한가지 경우에서 온도 T 및 수직 유속 u 의 측정은 30분간 측정하였는데, 처음 10분간은 전기열선의 발열 안정과 실린더 내부의 대류 및 열전달 현상이 안정되는 시간으로 간주하여 평균 산출에 사용하지 않았고, 이후에 측정된 20분간의 데이터만 추출하여 평균값 산출에 사용하였다. 실험의 전 과정은 대기압 상태의 무풍실에서 진행되었고, 측정 당시의 기온은 24 °C에 습도는 30% 내외였다.

3. 결과 및 분석

3.1 이론과 실험의 비교

Fig. 2는 발열량을 변경하면서 플룸 중심의 온도 T 와

수직 유속 u 를 높이에 따라 측정한 결과를 보여준다. Figs. 2(a)~2(b)는 개방된 상태에서의 온도 T 와 수직 유속 u 의 변화를 Eqs. (2), (3)의 결과와 비교하여 보여주고 있으며, Figs. 2(c)~2(f)는 실린더에 의해 제한된 상태의 온도 T 와 수직 유속 u 의 변화를 보여준다.

Fig. 2. Effect of Heating Power (Q_h) on Smoke Velocity (u) and Temperature (T) for Unconfined (Open) and Confined ($D=0.5$ and 0.14 m) Cases

개방된 상태에서 발열원으로부터 0.1 m 지점의 온도 T 가 220 W일 때는 182.6 °C였고 32 W일 때는 80.9 °C로 102.0 °C의 차이가 발생하였지만, 제한된 실험에서 실린더의 지름이 0.5 m인 경우 220 W일 때는 165.6 °C였고 32 W일 때는 87.4 °C로 78.2 °C의 차이가 발생하였으며, 실린더의 지름이 0.14 m인 경우 220 W일 때는 96.2 °C였고 32 W일 때는 49.7 °C로 46.5 °C의 차이만 보였다. 이를 통해 개방상태에서 제한 상태로 변경되고, 제한 상태에서도 실린더의 단면적이 작아질수록 플룸 초기의 온도 T 가 낮아지고 발열량 변화에 따른 온도 차이도 적어지는 것을 Figs. 2(b), 2(d), 2(f)를 통해 추정할 수 있다.

또한 수직 유속 u 의 측정 및 비교 결과에서도 개방된 상태에서 발열원으로부터 0.1 m 지점의 수직 유속 u 가 220 W일 때는 5.5 m/s였고 32 W일 때는 2.4 m/s로 3.1 m/s의 차이가 발생하였지만, 제한된 실험에서 실린더의 지름이 0.5 m인 경우 220 W일 때는 4.5 m/s였고 32 W일 때는 2.7 m/s로 1.8 m/s의 차이가 발생하였으며, 실린더의 지름이 0.14 m인 경우 220 W일 때는 3.7 m/s였고 32 W일 때는 1.2 m/s로 2.5

m/s의 차이를 보였다. 그리고 수직 유속 u 의 경우에도 개방 상태에서 제한 상태로 변경되고 단면적이 작아질수록 플룸 초기 수직 유속 u 가 낮아지고 발열량 변화에 의한 수직 유속 차이도 작아지는 것을 Figs. 2(a), 2(c), 2(e)를 통해 추정할 수 있다.

특히 단면적이 작아질수록 실린더 내부에서 발생한 플룸의 수직 확산 현상이 파이프 유동의 경향을 띠면서 온도 T 와 수직 유속 u 의 변화가 작아지는 것을 확인할 수 있는데, 실린더의 지름이 0.5 m인 경우 220 W일 때는 플룸의 중앙 온도 T 가 높이에 따라 165.6 °C에서 31.9 °C로 133.7 °C가 낮아졌고 32 W일 때는 87.4 °C에서 24.7 °C로 62.7 °C가 낮아진 반면, 지름이 0.14 m인 경우 220 W일 때는 96.2 °C에서 38.4 °C로 57.8 °C만 낮아졌고 32 W일 때는 49.7 °C에서 27.0 °C로 22.7 °C만 낮아진 것을 Figs. 2(d), 2(f)를 통해 확인할 수 있다. 이러한 현상은 수직 유속 u 의 변화에서도 유사하게 확인할 수 있는데, 실린더의 지름이 0.5 m인 경우 220 W일 때는 플룸의 중앙 수직 유속 u 가 높이에 따라 4.6 m/s에서 0.6 m/s로 4.0 m/s가 낮아졌고 32 W일 때는 2.7 m/s에서 0.1 m/s로 2.6 m/s가 낮아진 반면, 지름이 0.14 m인 경우 220 W일 때는 3.7 m/s에서 0.8 m/s로 2.9 m/s만 낮아졌고 32 W일 때는 1.3 m/s에서 0.4 m/s로 0.9 m/s만 낮아진 것을 Figs. 2(c), 2(e)를 통해 확인할 수 있다.

개방 상태에서 발열량이 변화할 때, 높이에 따라 측정된 온도 T 의 변화를 Eq. (3)과 비교하였는데, Eq. (3)이 약간 과소 예측의 경향을 보였지만 전체적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다. 수직 유속 u 의 경우, 발열원으로부터 높이가 0.3 m까지는 Eq. (3)에 비해 높게 측정되었지만, 그 이상의 높이에서는 잘 일치하는 경향을 보였다. 이러한 차이는 Eq. (3)이 점 발열원(point heat source)을 가정하였기 때문에 발열원의 표면으로부터 분사되는 유속이 없고 자연 상승하는 부력에 의해서만 플룸이 상승하는 것으로 가정한 반면, 실험에서는 하부의 공기가 열선을 통과하면서 제트류가 형성되어 발열원의 표면 높이 0 m에서 이미 임의의 질량 유동값을 갖기 때문인 것으로 추정된다. 하지만 이러한 제트류의 관성은 높이 0.4 m 이하에서 모두 소멸된 것으로 추정되며, 그 이상에서는 Eq. (3)과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig 2에서 확인한 바와 같이, 실린더의 단면적이 감소할수록 발열원에서 가까운 구역의 온도 T 가 감소하는 현상은 실린더 입구로 유입되는 외부 공기가 벽의 영향을 받아 실린더의 입구에서부터 발열원 주변의 난류 확산을 증가시키고, 이로 인해 초기 플룸 중심부의 냉각 효과가 커져서 발열원과 가까운 거리일수록 플룸 중앙의 온도 T 가 크게 감소한 것으로 추정할 수 있다. 동일한 관점에서, 실린더의 단면적이 감소할수록 발열원에서 가까운 구역의 수직 유속 u 가 감소하는 현상도 실린더의 입구로 유입되는 외부공기가 발열원 주변의 난류 확산을 증가시킨 것을 주요 원인으로 생각할 수 있다.

Fig. 3. Effect of Shaft Diameter (D) on Smoke Velocity (u) and Temperature (T) for all Heating Powers (Q_z)

Fig. 3은 실린더의 단면적에 변화를 주면서 플룸의 온도 T 와 수직 유속 u 의 변화를 높이에 따라 측정된 결과를 보여준다. Figs. 3(a)와 3(b)는 발열량이 32W일 경우이고, Figs. 3(c)와 3(d)는 144W, Figs. 3(e)와 3(f)는 220W일 경우에 대한 그림이다. 그리고 각각의 발열량에 대하여 Eqs. (2), (3)과 실험을 통해 측정된 제한 및 개방된 플룸의 온도 T 와 수직 유속 u 를 비교하여 보여준다.

Fig. 3의 온도 그래프 3(b), 3(d), 3(f)를 통해 발열원의 발열량이 커질수록 플룸의 중심 온도에 실린더 단면적이 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다.

발열원으로부터 0.1 m 지점의 플룸 중심의 온도 T 를 비교하면, 발열량이 32W인 경우 플룸이 개방 되었을 때 80.9 °C였고 실린더의 지름이 0.14 m로 제한되었을 때는 49.7 °C로 31.2 °C의 차이가 발생하였지만, 발열량이 220W인 경우 플룸이 개방되었을 때 182.6 °C였고 실린더의 지름이 0.14 m로 제한되었을 때는 96.2 °C로 86.4 °C의 차이가 발생하였다.

또한 동일한 지점에 대해 수직 유속 u 를 비교하면, Fig. 3(a)와 같이 발열량이 32W인 경우 플룸이 개방 되었을 때 2.4 m/s였고 실린더의 지름이 0.14 m로 제한되었을 때는 1.2 m/s로 1.2 m/s의 차이가 발생하였지만, Fig. 3(e)와 같이 발열량이 220W인 경우 플룸이 개방되었을 때 5.52 m/s였고 실린더의 지름이 0.14 m로 제한되었을 때는 3.74 m/s로 1.8 m/s의 차이가 발생하였다.

이러한 현상 역시 발열원의 발열량이 증가함에 따라 실린더 입구로 유입되는 외부 공기가 벽의 영향을 받아 발열원 주변의 난류 확산을 증가시키고, 이로 인해 초기 플룸 중심의 수직 상승 운동량이 감소하며, 단면적이 감소할수록 실린더 입구로 유입되는 외부 공기는 더욱 강하게 발열원 주변의 난류를 확산시켜 초기 플룸 중앙의 수직 유속 u 가 감소한 것으로 추정된다.

Fig. 3에서 확인한 것은 Fig. 2의 경우와 유사하게, 발열량이 증가함에 따라 발열원에서 가까운 구역의 온도 T 가 감소하는 현상을 실린더 입구로 유입되는 외부 공기가 벽의 영향을 받아 실린더의 입구에서부터 발열원 주변의 난류 확산을 증가시키고, 이로 인해 초기 플룸 중심부의 냉각 효과가 커져서 발열원과 가까운 거리일수록 플룸 중앙의 온도 T 가 크게 감소한 것으로 생각할 수 있으며, 실린더의 단면적이 감소할수록 발열원에서 가까운 구역의 수직 유속 u 가 감소하는 현상도 실린더의 입구로 유입되는 외부공기가 발열원 주변의 난류 확산을 증가시킨 것을 주요 원인으로 생각할 수 있다.

Fig. 4는 발열원의 발열량이 변화함에 따라 온도차 ΔT ($T - T_\infty$)의 변화를 높이 별로 측정하여 나타낸 그래프이며, 실린더의 크기에 따라 McCaffrey (1979)가 제시한 경험적 선도와 비교하여 보여준다.

이론과 실험에서는 Flame 및 Intermediate zone에 해당하는 유동이 없기 때문에 $\eta = 0, -1$ 일 때 경험적 선도와 일치하는 데이터가 없으며, 오직 Plume zone인 $\eta = -5/3$ 에서만 데이터가 분포하고 있다. 그리고 이론과 개방 실험의 온도차 ΔT 의 경우 경험적 선도와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4. Effect of Shaft Diameter (D) on Smoke Temperature (T) for All Heating Powers (Q_z) Compared with the Empirical Fit of McCaffrey (1979) on a Log-log Scale

Fig 4(c)에서 볼 수 있듯이 실린더의 지름이 0.5 m일 때에도 개방 실험의 결과와 같이 Plume zone에서 경험적 선도와 잘 일치하고 있음이 확인되었으나, 개방 실험의 결과와 비교

해서 온도차 ΔT 가 다소 감소한 것을 확인할 수 있다. 이것은 Figs. 2와 3에서 언급한 바와 같이 실린더 입구로 유입되는 공기의 냉각 효과 때문으로 생각할 수 있다.

Fig. 4(d)와 같이 실린더의 지름이 0.14 m일 때에는, 온도차 ΔT 가 경험적 선도와 일치하지 않는 경향을 보였다. 모든 발열량 실험에서 발열원에서 발생한 플룸의 중심 온도는 실린더 입구에서 유입되는 공기에 의해 냉각되어 경험적 선도의 훨씬 아래쪽에 위치하게 되지만 이론과 유사한 경향으로 수직 확산 하면서 온도차 ΔT 가 일정하게 감소한다. 그러나 높이 0.4 m 이상에서는 중심부의 온도차 ΔT 가 높이에 따라 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 이것은 실린더 내부의 유동이 중심부의 온도가 주변부의 온도보다 높았던 부력 플룸에서 중심부와 주변부의 온도가 평균화된 파이프 유동으로 바뀐 것을 의미한다.

Fig. 5는 발열량이 변화함에 따라 수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 의 변화를 높이 별로 측정한 결과이며, 실린더의 크기에 따라 경험적 선도와 비교하여 보여준다.

수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 의 경우에도 이론과 실험에서는 Flame 및 Intermediate zone에 해당하는 유동이 없기 때문에 $\eta = 1/2, 0$ 일 때 경험적 선도와 일치하는 데이터가 없으며, 오직 Plume zone인 $\eta = -1/3$ 에서만 이론과 실험 데이터가 분포하고 있다. 그리고 이론의 경우 경험적 선도와 잘 일치하고 있으며, 개방 실험의 경우 발열원에서 발생한 제트류의 운동량이 감소함에 따라 경험적 선도와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5. Effect of Shaft Diameter (D) on Smoke Velocity (u) for All Heating Powers (Q_z) Compared with the Empirical Fit of McCaffrey (1979) on a Log-log Scale

Fig. 5(c)에서 실린더의 지름이 0.5 m일 때에도 개방 실험의 결과와 같이 Plume zone에서 경험적 선도와 잘 일치하고 있음이 확인되었으나, 개방 실험과 비교해서 수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 의 감소가 발생한 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상도 Figs. 2와 3에서 언급한 바와 같이 실린더 입구로

유입되는 공기가 난류 확산을 증가시킨 효과 때문으로 생각할 수 있다.

Fig. 5(d)에서 실린더의 지름이 0.14 m일 때, 발열원에서 발생한 플룸은 이론과 유사한 경향으로 수직 확산 하면서 수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 의 감소가 발생하지만, 일정 높이 이상에서는 파이프 유동의 경향으로 바뀌면서 수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 이 높이에 따라 미소하게 상승하는 것을 확인하였다.

Fig. 5(d)와 같이 실린더의 지름이 0.14 m일 때는, 모든 발열량 실험에서 발열원에 의해 발생한 플룸의 중심부 수직 유속은 실린더 입구에서 유입된 공기에 의해 난류가 촉진되면서 수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 이 급격히 감소한다. 그러나 높이 0.4 m 이상에서는 오히려 중심부의 수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 이 약간 상승하는 것을 확인하였다. 이것은 실린더 내부의 부력 플룸이 난류성 파이프 유동으로 발달하는 과정에서, 실린더 벽의 마찰에 의해 벽 근처의 수직상승 운동량이 중심부로 전달되면서 수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 이 증가한 것으로 추정된다.

3.2 수치해석 결과

축소모형실험의 측정결과와 Eqs. (2), (3)의 결과를 검증하기 위하여 fire Dynamics Simulator (FDS) ver. 6.6.0을 사용하여 동일한 발열량과 개방, 제한 조건을 적용한 모델을 수치해석하였다.

수치해석에서 사용한 발열원의 발열량은 축소모형 실험에서 설정한 32, 144, 220W를 사용하였고, 각 발열량에 대하여 제한 실험을 모델링하기 위해 수직 샤프트의 단면적이 1.54×10^{-2} , 1.96×10^{-1} , $7.85 \times 10^{-1} \text{ m}^2$ 및 개방 실험의 구성을 모델링하여, 총 12가지의 경우에 대한 수치해석을 수행하였다.

모델링에 사용한 계산영역의 크기는 $0.9 \times 0.9 \times 2.0 \text{ m}^3$ 이고, 격자는 $72 \times 72 \times 200$ 개의 사각격자를 사용하였다. 격자 간격은 x, y 방향으로 비등간격 격자를 사용하였는데, 중심에서 최소 격자간격이 $1.24 \times 10^{-3} \text{ m}$ 이고 경계면에서 최대 격자간격이 $3.54 \times 10^{-2} \text{ m}$ 로 설정하였다. z 방향으로는 등간격 격자를 사용하였고 격자 간격은 0.01 m로 설정하였다. 계산영역의 상하 경계면은 개방하여 경계면에서의 유동이 자유롭게 이루어지도록 설정하였으며, 강제 유동은 없는 것으로 설정하였다. 수직 샤프트의 표면은 No-slip Condition을 적용하였고 벽에서의 열전달이 없도록 단열(adiabatic)조건을 적용하였다. 또한 열전달 모델에서 발열원으로부터 발생한 열류(heat flux)는 대류 및 복사 열전달로 전환되도록 설정하였다.

수치해석에 사용할 발열원을 모델링하기 위해 지름 0.03 m의 원형 면을 설정하고 수직 샤프트의 개방된 바닥면의 중심에 위치시켰다. 원형 면에는 단위면적당 대류성 열방출율을 45.27, 203.72, 311.23 kW/m^2 로 설정하여 축소모형실험에서 사용한 발열량 32, 144, 220W와 동일하게 맞추었고, 발열원으로부터 방출되는 질량 유량(mass flux)은 없는 것으로

로 설정하였다.

난류해석을 위한 LES모델은 VREMAN 모델을 사용하였고, 600초 동안의 유동을 해석하여 분석된 결과를 시간평균하여 사용하였다. 모델링에 사용한 대기의 조건은 온도 24.0 °C에서의 표준 대기 조건을 적용하였으며, 대기의 습도는 없는 것으로 가정하였다.

Fig. 6. Snapshots of Rising Smoke in an Open-air Condition for a Given Heating Power (First row) Experiment, (Second row) Numerical Temperature Contours using Fire Dynamics Simulators

Fig. 6은 개방 실험에서 발열량 변화에 따른 플룸의 형상 변화를 가시화한 실험 사진과 FDS의 수치해석 결과를 비교한 그림이다. 그림에서와 같이 개방된 발열원의 모든 발열량 실험에서 열선을 임의의 수직 유속으로 관통하는 제트류의 형상을 볼 수 있으며 높이 0.0~0.3 m 사이에서 관찰되었다. 이 제트류가 처음에는 층류 유동의 형상으로 발생해서 난류 유동으로 천이(transition) 하는 모습을 볼 수 있다. 하지만 FDS의 수치해석 결과에서는 발열원의 표면에서 발생한 난류성 부력 플룸이 서서히 수직 운동량을 증가시키며 상부로 확산하고, 외부공기가 플룸으로 유입되어 발달된 플룸으로 변화해 가는 모습을 보여주고 있다.

Fig. 7은 발열원의 발열량이 32, 144, 220W 일 때, 개방된 경우와 세가지 크기의 실린더로 제한된 플룸의 중앙 단면에서 온도 T 와 수직 유속 u 의 분포를 비교하여 보여준다.

Fig. 7. FDS Numerical Simulations of the Rising Smoke Velocity and Temperature Inside the Encasing Shafts of Various Sizes; $D = \infty, 1, 0.5$, and 0.14 m. The Heating Power is (a) $Q_e=32$ W, (b) 144W, and (c) 220W

3.3 수치해석과 실험의 비교

Fig. 8은 발열량이 144W일때, 개방된 경우와 실린더의 지름이 0.5, 0.14 m로 제한된 경우에 대하여 실린더 중앙에서 측정한 실험값과 FDS의 해석결과를 McCaffrey (1979)의 경험적 선도와 비교한 그림이다. Fig. 8에서 실험적 데이터의 수직 유속 $u/Q_e^{2/5}$ 이 열원에 가까울수록 FDS 결과보다 높은 값으로 측정되었고 온도 ΔT 가 발열원에 가까울수록 FDS의 결과보다 낮게 측정된 것을 확인할 수 있다. 이것은 FDS의 경우 발열원의 모델링을 열류(heat flux)만 발생하고 질량유량(mass flux)은 없는 것으로 모델링하였기 때문에 높이가 0 m인 발열원의 표면에서는 공기가 충분히 축열(heat condensation)되어 높은 온도의 플룸이 자연적인 부력에 의해 천천히 상승하지만, 실험에서는 열선에서 발생하는 열류와 함께 중앙을 관통하는 질량유동도 동시에 발생하면서 제트류가 형성되고, 이로 인해 충분히 축열되지 않은 플룸이 발생하여 빠르게 상승한 것을 주요 원인으로 생각할 수 있다.

개방된 경우에는 발열원에 의해 발생한 플룸이 자연적인 부력에 의해 상승하면서 주변 공기를 지속적으로 유입하여 온도와 수직 유속이 서서히 감소하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 경험적 선도와 잘 일치하고 있는 것을 Fig. 8(a)를 통해 확인할 수 있다. 하지만, 플룸이 지름 0.14 m인 실린더로 제한된 경우에는 발열원에 의해 발생한 플룸이 상승하면서

실린더 입구 주변의 공기를 다량으로 빨아 들여 온도가 급격히 감소하는 대신 플룸이 수직 확산하는 과정 중에는 주변 공기의 유입이 없어 온도가 일정하게 유지되며 파이프 유동의 특성을 가지게 되는 것을 Fig. 8(c)을 통해 확인할 수 있다. 특히 FDS의 경우 실린더 내부의 유동이 파이프 유동으로 완전히 발달되었기 때문에 수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 이 일정한 값으로 측정된 반면, 실험에서는 실린더 내부의 유동이 발열원에서 발생한 제트류의 영향으로 인해 플룸 유동에서 파이프 유동으로 완전히 발달되는 과정이 느리게 진행되어 수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 의 값이 서서히 증가한 것으로 추정된다.

Fig. 8. Smoke Velocity and Temperature Comparisons Between Experimental, Numerical, and Empirical Results for $Q_z=144\text{W}$

실린더의 지름 0.5 m로 제한된 경우에는 자연 부력에 의해 상승하는 개방된 경우와 완전히 발달되어 파이프 유동의 특성을 가진 0.14 m 실린더의 중간 성향을 보이고 있다. 즉, Fig. 8(b)와 같이 실린더 입구가 충분히 넓은 이유로 입구에서 유입되는 주변 공기는 발열원에서 발생한 플룸의 중심 온도와 수직 유속이 감소하는 데에 영향을 크게 미치지 않고 있다. 여기서 특이한 점은 실험의 경우 온도 ΔT 와 수직 유속 $u/Q_z^{2/5}$ 이 개방된 경우보다 약간 감소하는 경향을 보였지만, FDS의 결과에서는 오히려 약간 증가하는 경향을 보였는데, 이것 역시 FDS가 실린더 내부의 유동을 파이프 유동으로 빠르게 발달시켜 예측한 결과로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수직으로 관통된 실린더로 인해 제한된

발열원에 대하여, 발생한 플룸이 자연 부력으로 수직 확산하는 현상을 실험 및 수치해석적인 방법을 통해 측정하고 분석하였다. 플룸의 수직 확산 현상을 실험적으로 분석하기 위해 플룸의 수직 중심축을 따라 온도와 수직 유속을 측정하였고, 수치해석적인 방법을 통해 체적 유량을 분석하였다. 그리고 이렇게 분석된 결과값은 개방된 조건에서의 플룸 확산 이론식과 실험 및 수치해석 분석결과와 비교하고 검증하였다.

수치해석과 이론적인 예측 모두 열원 근처의 온도와 속도를 과소평가했다. 온도에 대한 이론적인 예측은 속도에 대한 예측보다 뛰어났으며, 이론에 의한 온도 예측은 우수하지만, 열원에서 상승할수록 속도 변화를 빠르게 예측하여 이론적인 예측과 다소 차이를 보였다.

샤프트 지름이 $D = 1\text{ m}$ 보다 크거나 같을 때, 두 온도 분포는 외기와 비슷했다. $D \leq 0.5\text{ m}$ 에서 대기와의 편차가 나타나기 시작했고 온도의 경우, $D = 0.5\text{ m}$ 의 데이터도 개방 조건과 일치했다.

샤프트의 지름이 $D = 0.14\text{ m}$ 일 때, 대기와의 편차가 온도와 속도 모두에 대해 명확하게 나타났다. 온도에 대한 FDS의 예측은 실험 데이터와 잘 일치했다. 그러나 속도에 대한 FDS의 예측은 실험 데이터에서 다소 벗어났다. FDS는 수직방향의 유속을 거의 일정한 속도로 예측하는 반면, 실험 데이터는 열원 근처에서 속도에 급격한 변화를 나타내었고 축 출구 근처에서 적당히 증가한 속도를 보였다.

본 연구를 통해 이론식에 의한 개방된 플룸의 확산 현상을 예측한 값이 실제의 측정값과 잘 일치함을 확인 하였으나, 제한된 플룸의 확산 현상을 이론식으로 예측하기 위해서는 추가의 연구가 필요할 것으로 판단되었다. 또한 이번 연구에서는 제한된 플룸의 변화를 이론과 실험 및 수치해석적인 방법으로 분석하였으며, 자연 부력에 의한 플룸이 파이프 유동으로 발달하는데 실린더의 단면적과 발열량의 크기를 중요한 영향 인자로 추론하였다. 이들 영향 인자들에 대한 관계가 정량적인 관계식으로 표현될 수 있을 것으로 추정되며, 이를 규명하기 위해 영향 인자에 대한 심층적인 후속 연구가 필요한 것으로 판단한다.

감사의 글

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

References

- Chu, V.H., and Baines, W.D. (1989). Entrainment by buoyant jet between confined walls. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 4, pp. 475-492.

- 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.
- 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, pp. 519-536.
- McCaffrey, B. (1979). *Purely buoyant diffusion flames: Some experimental results*. NBSIR 79-1910, Final Report, National Bureau of Standards.
- 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, pp. 77-84.
- Meroney, R.N. and Yang, B.T. (1971) Gaseous plume diffusion about isolated structures of simple geometry. In H.M. Englund and W.T. Beery (Eds.), *Proceedings of 2nd International Clean Air Congress* (pp. 1022-1029), New York: Academic Press.
- Papanicolaou, P.N. (1984) *Mass and momentum transport in a turbulent buoyant vertical axisymmetric jet*. Report No. KH-R-46, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA. doi:10.7907/Z9SQ8XCQ
- 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. (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.
- Qi, D., Wang, L. and Zmeureanu, R. (2015). Modeling smoke movement in shafts during high-rise fires by a multizone airflow and energy network program. *ASHRAE Transactions*, Vol. 121, No. 2, pp. 242-251.
- Qi, D., Wang, L., and Zmeureanu, R. (2017) The effects of non-uniform temperature distribution on neutral plane level in non-adiabatic high-rise shafts during fires. *Fire Technology*, Vol. 53, pp. 153-172.
- Quintiere, J.G. (2002). Fire behavior in building compartments. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 1, pp. 181-193.
- Xiao, G., Tu, J., and Yeoh, G. (2008). Numerical simulation of the migration of hot gases in open vertical shaft. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 5-6, pp. 478-487.
- 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.
- Zukoski, E.E. (1976). *Prediction of smoke movement in buildings*.

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