

수직 배연구의 자연배연 성능에 관한 수치해석연구 A Numerical Study for the Performance of Natural Smoke-venting of a Vertical Vent

전흥균[†] · 최영상 · 추홍록

Heung-Kyun Jeon[†] · Young-Sang Choi · Hong-Lok Choo

대구보건대학 소방안전관리과
(2008. 2. 19. 접수/2008. 11. 6. 채택)

요 약

본 연구에서는 미국 NFPA 204 기준에 의해 설계된 수직 배연구에 대하여 배연구의 위치, 외기 온도, 풍속 및 화재크기가 자연배연 성능에 미치는 영향과 화재특성을 CFAST 프로그램을 사용하여 수치 해석적으로 조사하였다. 배연구는 외벽의 최고 상부에 위치한 경우와 외기온도가 낮은 경우 및 풍속이 작은 경우 배연성능기준을 만족하였다. 또 화재크기가 클수록 배출량은 증가하나 연기층 높이는 낮아져 배연성능기준을 만족하지 못하였다. 직접 외기와 통하는 수직 자연배연구의 설계시 해당지역의 최고 온도와 최대 풍속을 고려하고, 설계화재를 정확히 결정하여 배연성능기준이 만족되도록 주의가 요망된다.

ABSTRACT

In this study, the effects of vent location, outside temperature, wind velocity and fire size on the performance of natural venting of the vertical vent designed according to NFPA 204 standard and fire characteristics were numerically investigated using CFAST. In cases of the Vent located on most upper wall, lower outside temperature and lower wind velocity, vents met the performance criteria of venting. The larger fire size becomes, the more mass flow rate through a vent becomes, but the lower interface height of smoke layer becomes, so that vent didn't meet the performance criteria of venting. It should be noted that a natural vertical vent be designed considering maximum outside temperature and maximum wind velocity and developing a design fire accurately in order to meet the performance criteria of venting.

Keywords : natural venting, vertical vent, CFAST, performance criteria, design fire

1. 서 론

다중이용업소, 공연장, 관람장, 전시장, 예식장 및 집회장 등 출입인구밀도가 높은 장소에서의 화재시 초기 화재 대응이 늦어질 경우에 대형 화재로 이어져 인명과 재산상의 큰 피해를 초래하게 된다. 대형 화재시 인명손실의 가장 큰 원인은 주로 연기나 독성가스에 의한 사망으로, 피난 도중 거주자가 고온 연기나 독성가스에 장시간 노출됨에 따라 질식사 하는 경우가 대부분이다. 따라서 이러한 화재위험으로부터 피난안전을 확보하기 위하여 국내소방법에서는 소화활동설비의 소방시설 적용기준 제1호의 규정에 따른 제연설비를 설

치 및 유지관리하도록 정하고 있다.

화재시 제연방법에는 차단, 희석, 가압, 방연, 배연 등이 있으며, 제연구역에 적용할 경우 제연 효과를 높일 수 있도록 제연대상물의 구조적 특성, 제연설비의 설치 환경, 각종 제연설비의 특성과 적용성 등을 잘 고려하여야 한다.¹⁾ 본 연구에서 다루고자 하는 자연배연설비는 화재시 열의 체적팽창효과와 고온 연기의 부력 효과에 의해 지붕과 외벽 등에 설치된 배연구를 통하여 연기를 자연 배출하는 방식으로, 타 제연설비에 비해 설치가 간단하고 유지관리가 용이하며 시공비가 적게 든다는 장점이 있다. 이 제연설비는 일반적으로 중층 건물에 적합하다.²⁾

자연배연구는 설치 방향에 따라 수평 배연구와 수직 배연구로 구분된다. 수평 배연구는 바닥면의 수평으로,

[†]E-mail: jeonhk@mail.dhc.ac.kr

수직 배연구는 바닥면의 수직으로 외부와 접하는 지붕과 외벽에 각각 설치되어 제연구역내의 연기를 직접 외부로 배출시키며, 거주자가 안전하게 피난 할 수 있도록 배연성능을 갖추어야 한다.³⁾

지금까지 배연구와 관련된 연구로는, Qing Tan과 Yogesh Jaluria⁴⁾의 '구획화재시 수평 배연구의 자연 및 강제대류 유동에 대한 실험적 연구', Leonard Y. Cooper⁵⁾의 '천장과 바닥면의 수평 배연구를 통한 유량 계산', S. H.-K. Lee, W. K.-S. Chiu와 Y. Jaluria⁶⁾의 '수평 배연구가 있는 밀폐공간 화재의 실험적 연구' 등의 수평 배연구에 대한 연구와 Abib, A. H. and Jaluria⁷⁾의 '부분 개방된 밀폐공간의 부력유동에 대한 수치해석', Rodney A. Bryant⁸⁾의 '출입문을 통한 부력 유동의 PIV 측정' 등의 수직 배연구에 대한 연구가 다수 있다. 상기의 연구들은 천장에 설치된 수평 배연구의 유동속도 및 배출량의 계산과 단일 수직개구부의 유동속도 측정과 관련된 연구로서, 본 연구에서 수행하고자 하는 외기조건 등이 수직 배연구의 배연성능에 미치는 영향에 대한 연구 내용은 거의 없는 실정이다.

국내화재안전기준의 제연설비와 관련하여 특정소방대상물 중 문화집회장의 경우, 무대부의 바닥면적이 200 m² 이상시 제연설비를 설치하도록 정하고 있다. 그러나 직접 외기로 통하는 배출구 면적의 합계가 당해 제연구역 바닥면적의 1/100 이상이며, 배출구로부터 각 부분의 수평거리가 30 m 이내이고, 공기유입이 화재안전기준(외기를 직접 자연유입 할 경우에 유입구의 크기는 배출구의 크기 이상인 경우)에 적합하게 설치되어 있는 경우에는 제연설비 설치가 면제된다고 규정하고 있다.⁹⁾

실제 국내 소방업계에서는 제연설비의 면제기준에 의해 직접 외기로 통하는 배출구 면적의 합계가 당해 제연구역 바닥면적의 1/100 이상이면 다른 설계기준 없이 단지 바닥면적의 1/100 이상 조건만 충족되도록 배연구의 면적을 계산하고, 그 외기조건이 배연성능에 미치는 영향에 대한 확인 없이 설치하는 것이 현실이다. 이와 같은 설계로 설치된 배연구는 외기조건이 변화에 따라 그 성능을 보증할 수 없으며, 최악의 경우 피난안전에 큰 문제가 발생할 수 있다. 따라서 신축 건물의 외벽에 수직 배연구를 설치할 경우 배연성능을 확보할 수 있도록 해당 지역의 외기조건 등이 배연성능에 미치는 영향을 조사하여 설계시 반영하는 것이 필요하다고 사료된다. 특히, 최근에 일부 법 규정에 도입 적용되고 있는 화재영향평가와 성능위주설계를 고려한다면 배연설비에 대한 성능 확인은 더욱 요망되어진다고 할 수 있다. 이에 본 연구를 통하여 현재 적용되

고 있는 설계의 문제점과 이에 대한 개선점을 제안하고자 한다.

본 연구에서는 zone 모델인 CFAST(ver. 6.0.10)를 사용하여 미국 NFPA 204 기준에 의해 설치된 수직 배연구에 대하여 화재시 배연구의 위치, 외기 온도, 풍속 및 화재크기가 수직 배연구의 자연배연 성능에 미치는 영향과 화재특성을 수치 해석적으로 조사하였다.

본 연구의 목적은 수직 배연구의 자연배연 성능과 화재실의 화재특성을 조사하여 자연배연설비의 성능위주설계시, 거주자의 피난안전계획수립시 및 제연설비 설치기준에 대한 보완 작업시 기초자료를 제공하고, 화재영향평가의 실무 작업에 도움이 되도록 하는 것이다. 후속 연구에서는 본 연구에서 얻어진 화재시물레이션 결과분석 내용을 실제 수직자연배연구가 설치된 건물에 적용하여 화재시 배연구의 자연배연성능과 배연구의 작동이 화재 및 피난안전에 미치는 영향에 대한 내용을 다루고자 한다.

2. 자연배연과 배연구 설계

2.1 자연배연

열과 연기 배출이란 화재실의 상부로부터 외부로의 고온 연기의 제거와 더불어 주위 공간 또는 외부로부터 신선한 공기가 유입되도록 하는 것을 말한다. 배연에 의한 제연은 화재실내 개진 창문 또는 설계된 배연구를 통한 고온의 연기 부력과 팽창에 의한 자연 배출, 배출기의 작동과 수평수직 배출풍도 및 유입풍도를 통한 화재실내 연기의 강제 배출, 앞의 두 경우가 복합적으로 작용되도록 하여 연기를 배출시키는 통합배출이 있다.

공학적 설계에 의한 연기배출의 주목적은 고온의 연기가 피난경로공간으로 확산되는 것을 막아 화재위험으로부터 실내거주자가 피난을 안전하게 할 수 있도록 하고, 소방진압대원이 확보된 시야를 통해 화재건물 내 진입과 화원의 발견을 용이토록 하여 화재를 진압할 수 있도록 하며, 화재건물과 시설이 고온의 연기에 장시간 노출 되는 것을 방지하여 재산피해를 최소화 할 수 있도록 하는 것이다.¹⁰⁾

단일 수직 배연구를 통한 유동은 배연구의 높이에 걸쳐 내외부의 차압(식(1))에 따라 유입 및 유출될 수도 있고, 또는 중립면이 있는 경우 유입유출이 동시에 될 수도 있다. 이때 배출량의 계산은 유동상태에 따라 같은 유동방향에 해당하는 부분에 대해 적분구간을 구분 한 후 베르누이 식을 이용한 배연구의 평균유속 계산식(식(2))과 오리피스 유량식(식(3), (4))을 사용하여

계산한다.¹¹⁾

$$\Delta P_{i-o}(z) = P_i(z) - P_o(z) \quad (1)$$

$$|V_v(z)| = \left[\frac{2|\Delta P_{i-o}(z)|}{\rho_v(z)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$Q_v = C_d \int_{z_B}^{z_T} V_v dA \quad (3)$$

$$= C_d \int_{z_B}^{z_T} \left[\frac{2|\Delta P_{i-o}(z)|}{\rho_v(z)} \right]^{1/2} dA \quad (4)$$

$$\dot{m}_v = C_d \rho_v(z) \int_{z_B}^{z_T} V_v dA \quad (5)$$

$$= C_d \int_{z_B}^{z_T} [2\rho_v(z)|\Delta P_{i-o}(z)|]^{1/2} dA$$

본 연구의 배연구와 외기유입구의 유동은 단일방향 유동으로서 개구부 중간에 중립면이 존재하지 않는다. 즉, 상부 배연구를 통해 고온 연기가 외부로 배출되어 지고, 하부 외기유입구를 통해 외기가 내부로 유입되어지는 각각 단일방향 유동이 발생한다.¹²⁾(Figure 1 참조)

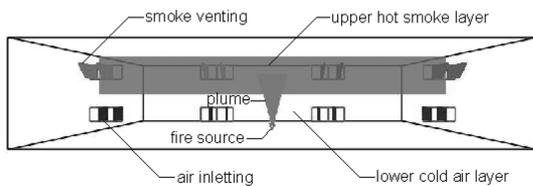


Figure 1. Smoke venting and air inletting.

2.2 배연구 설계

본 연구에서는 특정소방대상물 중 문화집회장의 바닥면적이 400 m²인 구획에 대해 자연배연설비의 배연구를 설계하여 화재모델로 적용하였다.

자연배연설비의 설계기준에서 ‘미국 NFPA 204 Standard for smoke and heat venting; 2002 edition’과 ‘국가화재안전기준 NFSC 501’은 다음과 같다.

미국 NFPA 204 기준¹³⁾에 의하면 「화재열기류의 질량유량식은

$$L < z_s, \quad \dot{m}_p = \frac{0.071\dot{Q}_c(z_s - z_0)^{5/3}}{[1 + 0.027\dot{Q}_c(z_s - z_0)^{-5/3}]} \quad (5a)$$

$$L < z_s, \quad \dot{m}_p = 0.0056\dot{Q}_c \frac{z_s}{L} \quad (5b)$$

이고, 또 배연구의 질량유량식은

$$\dot{m}_v = \frac{C_{d,v} A_v}{\sqrt{1 + \frac{C_{d,v}^2 A_v^2 (T_a)}{C_{d,i}^2 A_i^2 (T)}}} \sqrt{2\rho_a^2 g d_s} \sqrt{\frac{T_a(T - T_a)}{T^2}} \quad (6)$$

이다. 따라서 고온 연기층이 설계높이 아래로 내려가지 않도록 하기 위해서는 배연구를 통한 질량유량이 화재열기류의 질량유량 이상($\dot{m}_v \geq \dot{m}_p$) 되도록 배연구의 최소면적을 설계하여야 한다.」라고 정하고 있다.

국가화재안전기준 NFSC 501¹⁴⁾은 「바닥면적이 400 m² 이상인 거실의 예상제연구역의 배출량은 직경 40m인 원의 범위 안에 있을 경우에는 40,000 m³/hr 이상 할 것」으로 정하고 있다.

두 기준을 비교하면 자연배연설비의 배연구 설계시 국가화재안전기준은 미국 기준에 비해 매우 단순하며, 공학적 설계 개념이 부족하다는 것을 알 수 있다. 또 앞서 서술한대로 실제 소방업계에서는 제연설비의 면적기준을 적용하여 직접 외기로 통하는 배출구 면적의 합계가 당해 제연구역 바닥면적의 1/100 이상 조건만 만족 되도록 배출구의 면적을 결정하여 설계하고 있다. 이러한 설계는 공학적 설계와는 거리가 멀다고 사료되어 진다.

따라서 본 연구에서는 성능위주설계를 고려하여 미국 NFPA 204 기준을 적용하여 배연구의 면적을 계산하였다. 화재면적이 1 m²이고, 열방출율이 1750 kW의 화재에 대하여 식(5b)와 식(6)을 사용하여 계산된 전체 배연구의 면적은 2.4 m²이고, 단위 배연구의 면적은 0.3 m²이다. 배연구의 폭과 높이는 0.6 m×0.5 m이다.

3. 화재모델링

3.1 화재모델

본 연구의 화재모델은 단일공간의 한 쪽 벽면에 배연구와 외기유입구를 설치한 구획으로 크기는 폭(W)×깊이(D)×높이(H)가 20.0 m×20.0 m×4.0 m이다.

배연구와 외기유입구는 폭(w_v)×높이(h_v)가 각각 0.6 m×0.5 m로 동일한 크기이다. 설치 위치는 국가화재안전기준 NFSC 501의 기준(배연구의 하단과 바닥간의 최소거리가 2 m 이상과 외기유입구의 높이는 바닥으로부터 1.5 m 이하)를 고려하여 z_1 과 z_2 이고, 상호간 간격은 d 이며, 화재초기부터 시뮬레이션 종료까지 개방상태이다.

화원은 구획바닥 중앙에 위치하며, 화재크기는 가로×세로가 1.0 m×1.0 m이다. 설계화재는 배연성능에 대한 해석을 용이하게 할 수 있도록 정상상태 화재를 고려하였다. 열방출율은 1750 kW이며, 화재시뮬레이션 시간은 600초이다.

구획온도는 20°C이며, 천장은 석고보드, 외벽과 바닥은 콘크리트이다(Figure 2 참조).

본 연구에서는 배연구가 설치되지 않은 화재모델(No. 0)의 화재특성을 먼저 조사하고, 이어 배연구와 외기유

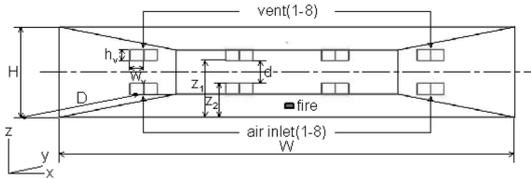


Figure 2. Schematic of fire model.

입구의 위치(z_1, z_2) 외기 온도(T_{out}), 풍속(V_{wind}) 및 화재크기(HRR)가 배연구의 배연성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 각 조건을 변화시켜가며 해당 화재모델(No. 1-11)을 만들어 화재시뮬레이션을 수행하였다. 화재모델에 대한 내용을 Table 1에 나타내었다.

3.2 배연성능 기준

본 연구에서는 배연구의 위치, 외기 온도, 풍속 및 화재크기가 배연구의 배연성능에 미치는 영향에 대한 결과를 화재모델별로 상호 비교할 수 있도록 배연구의 질량유량(배연량)과 연기층 높이에 대하여 Table 2의 성능기준을 적용하였다. Table 2에 나타난 성능기준은 미국 NFPA 204를 적용하여 계산한 값이다.

Table 2. The performance criteria for smoke venting

Parameter	Criterion
Mass flow rate through smoke vent (\dot{m}_c)	$\dot{m}_c \geq 0.49 \text{ kg/s}$
Interface height of smoke layer (z_c)	$z_c \geq 2.0 \text{ m}$

Table 1. The parameters related to Fire Modeling

Fire model	Vent location			Outside temp. $T_{out}(^{\circ}\text{C})$	Wind velocity $V_{wind}(\text{m/s})$	Fire size HRR(kW)	Classification
	$z_1(\text{m})$	$z_2(\text{m})$	$d(\text{m})$				
0	-	-	-	20	0	1750	no vent
1	2.5	1.5	1.0	20	0	1750	vent location
2	3.0	1.0	2.0	20	0	1750	vent location
3	3.5	0.5	3.0	20	0	1750	vent location
4	3.5	0.5	3.0	35	0	1750	outside temp.
5	3.5	0.5	3.0	5	0	1750	outside temp.
6	3.5	0.5	3.0	-10	0	1750	outside temp.
7	3.5	0.5	3.0	20	1	1750	wind velocity
8	3.5	0.5	3.0	20	3	1750	wind velocity
9	3.5	0.5	3.0	20	5	1750	wind velocity
10	3.5	0.5	3.0	20	0	3500	fire size
11	3.5	0.5	3.0	20	0	5250	fire size

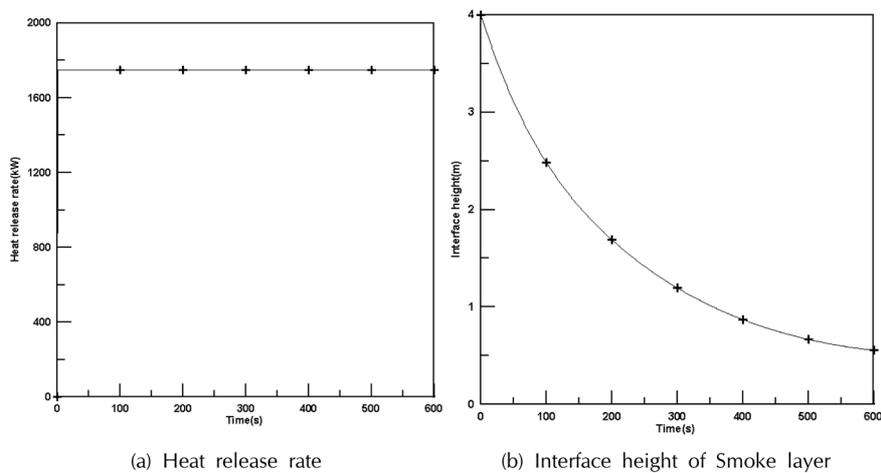


Figure 3. The results of simulation for fire model No. 0(no vent).

4. 결과 및 고찰

4.1 배연구가 없는 화재모델(No. 0)의 화재특성

Figure 3은 배연구가 없는 화재모델(No. 0)에 대한 화재모의실험 결과로서 발화 후 600초까지 화재실의 열방출율과 연기층의 높이를 나타낸다.

Figure 3(a)는 화재실의 열방출율을 나타낸 그림으로 최대열방출율은 점화 1초 후 1750 kW까지 증가하고, 이후 600초까지 정상상태이다.

Figure 3(b)는 연기층의 높이를 나타낸 그림으로 최대 연기층의 높이는 바닥으로부터 0.56 m이다. 이때 상부연기층의 온도는 250°C이다. 이것은 화재실의 공간 규모가 커 화재시뮬레이션 시간 동안 연소에 필요한 공기가 충분히 공급되어 정상 연소가 되었기 때문이다.

4.2 배연구 위치에 대한 배연성능

화재시 열팽창과 부력에 의한 유동으로 구획 상부의 내부압력은 외부보다 높고, 반대로 하부의 내부압력은 외부압력보다 낮아져 상부 배연구 전체면적을 통하여 연기가 배출되고 외기유입구 전체면적을 통하여 외기가 유입되는 단일유동이 발생하게 된다.

Figure 4는 화재모델 No. 1, 2, 3에 대한 배연구와 외기유입구의 질량유량과 연기층높이를 나타낸 그림이다.

Figure 4(a)에서 화재모델 No. 1, 2, 3의 배연구의 최대 배출질량유량은 각각 0.40 kg/s, 0.46 kg/s, 0.52 kg/s 이고, 외기유입구의 최대 유입질량유량은 각각 0.39 kg/s, 0.45 kg/s, 0.51 kg/s이다. Figure 4(b)에서 화재모델 No. 1, 2, 3의 최대 연기층높이는 바닥으로부터 1.89

m, 2.13 m, 2.35 m이다. 배연구와 외기유입구가 각각 상부와 하부에 위치할수록 질량유량이 커지고 연기층높이가 높아진다. 배연구와 외기유입구의 위치가 화재시 구획 내에 형성된 중성대에서 상하부 양방향으로 멀어질수록 내외부의 압력차가 더 커져 배출 및 유입 유량이 증가하였기 때문이다.

화재모델 No. 1의 질량유량은 화재모의시간동안 질량유량기준(\dot{m}_c) 보다 작고, 연기층높이는 $t=220s$ 이후 연기층높이 기준(z_c)보다 낮다.

화재모델 No. 2의 질량유량은 화재모의시간동안 질량유량기준보다 작고, 연기층높이는 화재모의시간동안 연기층높이 기준보다 높다.

화재모델 No. 3의 질량유량은 $t=206s$ 이후 질량유량 기준보다 크고, 연기층 높이는 화재모의시간동안 연기층높이 기준보다 높다. 화재모델 No. 3은 2개 기준 모두 만족한다.

따라서 건물 외벽에 설치되는 배연구와 외기유입구의 위치는 가능한 외벽의 최고 상부와 하부에 설치하여야 배연성능을 보장할 수 있다고 사료된다.

4.3 외기온도에 대한 배연성능

외기온도에 대한 배연성능을 조사하기 위한 화재모의실험조건은 화재모델 No. 3을 기본화재모델($T_{out}=20^\circ C$)로 하여 외기온도를 35°C, 5°C, -10°C로 변화시켜 화재모의실험을 수행하였다.

Figure 5는 화재모델 No. 3, 4, 5, 6에 대한 배연구와 외기유입구의 질량유량과 연기층높이를 나타낸 그림이다. 화재모델 No. 3은 결과 비교를 위하여 포함하

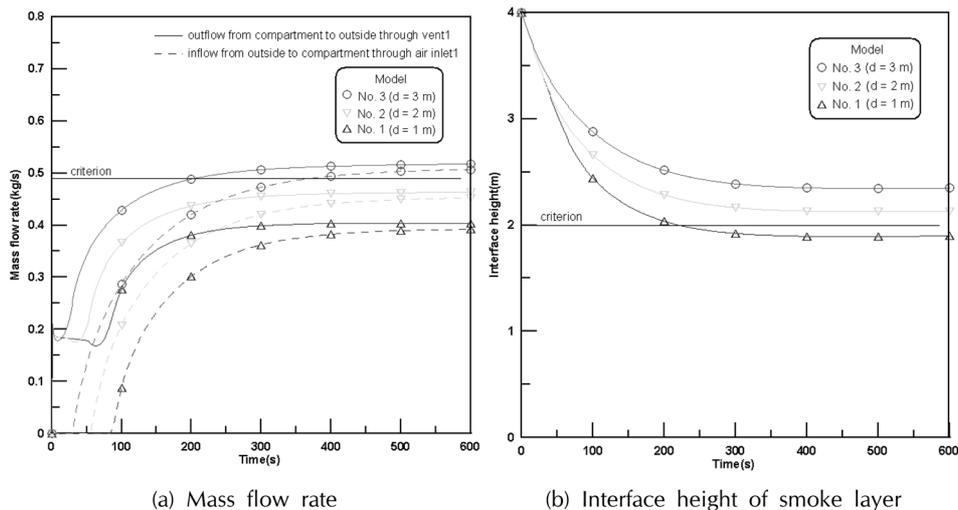


Figure 4. The effects of vent location.

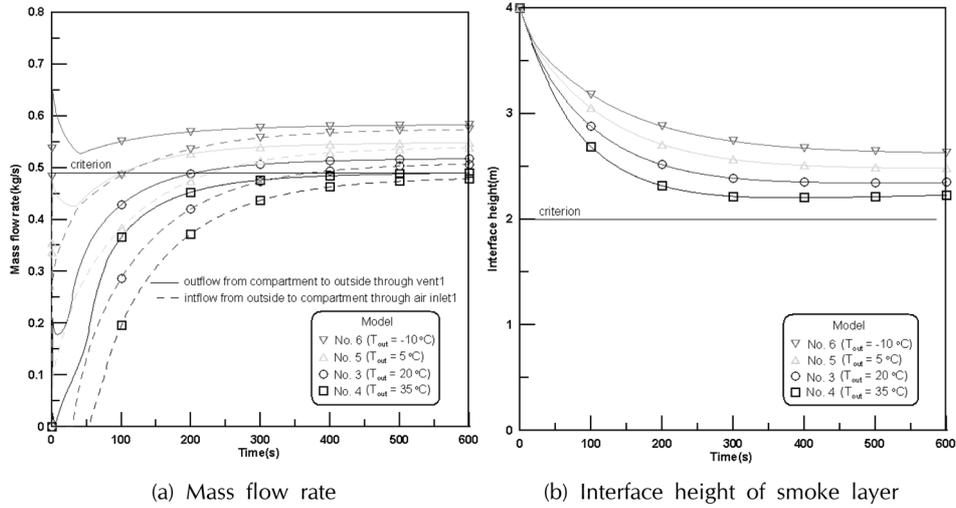


Figure 5. The effects of outside temperature.

였다.

Figure 5(a)에서 화재모델 No. 4, 5, 6의 배연구의 최대 배출질량유량은 각각 0.49 kg/s, 0.55 kg/s, 0.58 kg/s이고, 외기유입구의 최대 유입질량유량은 각각 0.48 kg/s, 0.54 kg/s, 0.57 kg/s이다. Figure 4(b)에서 화재모델 No. 4, 5, 6의 최대 연기층높이는 바닥으로부터 2.23 m, 2.48 m, 2.63 m이다. 외기온도가 낮을수록 질량유량과 연기층의 높이는 커진다. 이것은 기체밀도는 온도의 함수로서 온도가 낮을수록 밀도는 더 커지며, 또 외부의 온도가 낮아짐에 따라 화재시 내외부의 온도차이가 더 커져 최대배출온도차조건($T=2T_a$)에 더 가깝게 되었기 때문이다.¹⁵⁾

화재모델 No. 4의 질량유량은 $t=595\text{s}$ 이후 질량유량 기준보다 크고, 연기층높이는 화재모의시간동안 연기층의 높이 기준(z_c)보다 높다.

화재모델 No. 5, 6의 질량유량과 연기층 높이는 화재모의시간동안 기준보다 크다.

외기온도가 배연구의 배연성능에 미치는 영향은 겨울철보다는 여름철이 더 크게 작용된다. 따라서 설계시 여름철 최고온도를 고려하여 배연성능을 확인하는 것이 필요하다.

4.4 풍속에 대한 배연성능

풍속에 대한 배연성능을 조사하기 위한 화재모의실험조건은 화재모델 No. 3을 기본화재모델($V_{wind}=0\text{ m/s}$)로 하여 배연구가 설치된 벽면 정면으로 향하는 풍속을 1 m/s, 3 m/s, 5 m/s로 변화시켜 화재모의실험을 수행하였다.

Figure 6은 화재모델 No. 3, 7, 8, 9에 대한 배연구와 외기유입구의 질량유량과 연기층높이를 나타낸 그림이다. 앞의 경우처럼 화재모델 No. 3은 결과 비교를 위하여 포함하였다.

Figure 6(a)에서 화재모델 No. 7, 8, 9의 배연구의 최대 배출질량유량은 각각 0.51 kg/s, 0.46 kg/s, 0.37 kg/s이고, 외기유입구의 최대 유입질량유량은 각각 0.50 kg/s, 0.45 kg/s, 0.36 kg/s이다. Figure 4(b)에서 화재모델 No. 7, 8, 9의 최대 연기층높이는 바닥으로부터 2.32 m, 2.14 m, 1.71 m이다. 풍속이 클수록 질량유량은 작아지고 연기층은 낮아진다. 이것은 풍속이 클수록 외벽에 작용하는 풍압이 증가하여 연기 배출이 방해됨에 따라 배출량이 감소되고, 구획하부의 내외부 압력 차이가 감소됨에 따라 유입량도 감소되었기 때문이다.

화재모델 No. 7의 질량유량은 $t=230\text{s}$ 이후 질량유량 기준보다 크고, 연기층높이는 화재모의시간동안 연기층높이 기준보다 높다.

화재모델 No. 8의 질량유량은 화재모의시간동안 질량유량기준보다 작고, 연기층높이는 화재모의시간동안 연기층높이 기준보다 높다.

화재모델 No. 9의 질량유량은 화재모의시간동안 질량유량기준보다 작고, 연기층 높이는 $t=155\text{s}$ 이후 연기층높이 기준보다 낮다. 화재모델 No. 7은 $t=230\text{s}$ 이후 2개 기준 모두 만족한다.

풍속이 클수록 배연구의 배연성능에 영향을 크게 미친다. 따라서 해당 지역의 최대풍속을 고려하여 배연구를 설계하여야 한다.

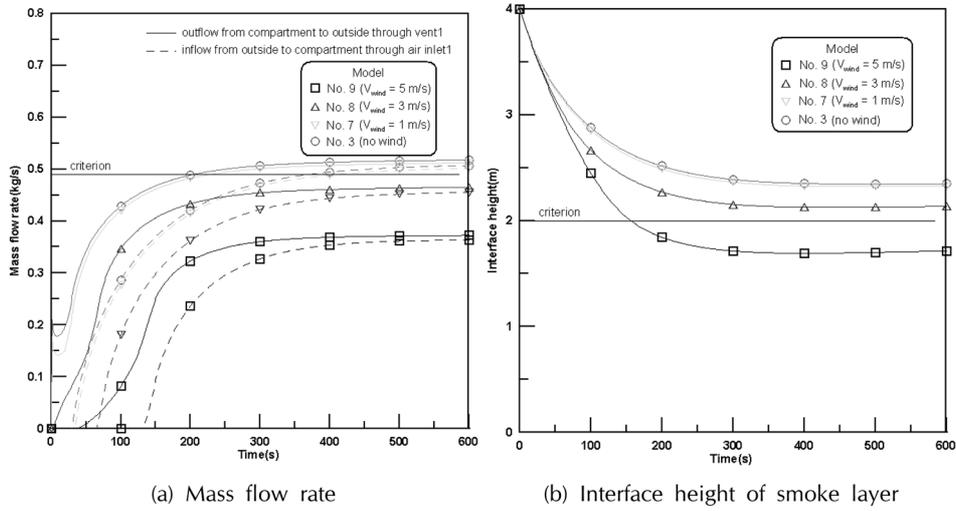


Figure 6. The effects of wind velocity.

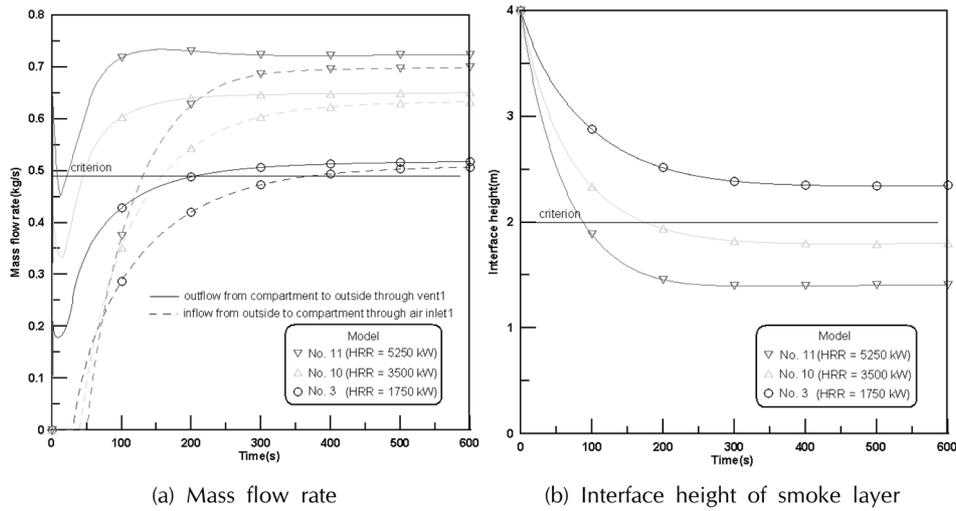


Figure 7. The effects of fire size.

4.5 화재크기에 대한 배연성능

화재크기에 대한 배연성능을 조사하기 위한 화재모의 실험조건은 화재모델 No. 3을 기본화재모델(HRR=1750 kW)로 하여 열방출율을 3500 kW, 5250 kW로 변화시켜 화재모의 실험을 수행하였다.

Figure 7은 화재모델 No. 3, 10, 11에 대한 배연구와 외기유입구의 질량유량과 연기층높이를 나타낸 그림이다.

Figure 7(a)에서 화재모델 No. 10, 11의 배연구의 최대 배출질량유량은 각각 0.65 kg/s, 0.72 kg/s이고, 외기유입구의 최대 유입질량유량은 각각 0.63 kg/s, 0.70 kg/s이다. Figure 7(b)에서 화재모델 No. 10, 11의 최대 연

기층높이는 바닥으로부터 1.80 m, 1.41 m이다. 화재크기가 클수록 질량유량은 커지고, 연기층 높이는 낮아진다. 이것은 화재크기가 클수록 열팽창과 부력이 크게 작용하여 내외부의 압력차가 증가하여 배출 및 유입 유량은 증가하나 연기발생량이 배연량 보다 더 커져 연기층의 높이가 더 낮아졌기 때문이다.

화재모델 No. 10의 질량유량은 $t=45$ s 이후 질량유량 기준보다 크고, 연기층높이는 $t=155$ s 이후 연기층높이 기준보다 작다.

화재모델 No. 11의 질량유량은 $t=22$ s 이후 질량유량 기준보다 크고, 연기층높이는 $t=87$ s 이후 연기층높이

Table 3. The summary of the results for fire models

Fire model	Mass flow rate			Interface height			Classification
	$t_{m_v, t=0.49}$ (s)	$\dot{m}_{v, t=600}$ (kg/s)	$\frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_c}$	$t_{z_c=2.0}$ (s)	$Z_{s, t=600}$ (m)	$\frac{Z_s}{Z_c}$	
1	N/A	0.40	0.82	220	1.89	0.95	vent location
2	N/A	0.46	0.94	N/A	2.13	1.07	vent location
3	206	0.52	1.06	N/A	2.35	1.18	vent location
4	595	0.49	1.00	N/A	2.23	1.12	outside temperature
5	100	0.55	1.12	N/A	2.48	1.24	outside temperature
6	1	0.58	1.18	N/A	2.63	1.32	outside temperature
7	230	0.51	1.04	N/A	2.32	1.16	wind velocity
8	N/A	0.46	0.94	N/A	2.14	1.07	wind velocity
9	N/A	0.37	0.76	155	1.71	0.86	wind velocity
10	45	0.65	1.33	175	1.80	0.90	fire size
11	22	0.72	1.47	87	1.41	0.71	fire size

기준보다 작다. 화재모델 No. 10, 11 모두 기준을 만족하지 못한다.

따라서 설계화재의 결정은 배연성능에 큰 영향을 미치므로 시공 후 배연성능에 문제가 발생하지 않도록 정확히 결정하여야 한다.

화재모델 11개의 화재시뮬레이션 결과를 정리하여 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 $t_{m_v, t=0.49}$ 와 $t_{z_c=2.0}$ 은 질량유량과 연기층높이가 각각 0.49 kg/s와 2.0 m 값이 되는 시간을 나타내고, $\dot{m}_{v, t=600}$ 와 $Z_{s, t=600}$ 은 t=600s의 질량유량과 연기층높이를 나타낸다.

Figure 8은 화재모델별 성능기준에 대한 만족여부를 쉽게 알아볼 수 있도록 질량유량과 연기층높이를 각각 질량유량 기준($\dot{m}_c=0.49$ kg/s)과 연기층높이 기준($z_c=2.0$ m)으로 나누어 비율로 나타낸 그림이다. 그림에서 비율이 1보다 큰 화재모델은 성능기준을 만족한다.

화재모델 No. 3의 결과를 기준으로 배연구와 유입구의 간격(d)이 1/3배로 줄어든 경우 질량유량은 22.6%, 연기층높이는 19.5% 감소되었다. 외기온도가 15°C로 높아진 경우 질량유량은 5.6%, 연기층높이는 5.1% 감소되었으며, 풍속이 5 m/s로 커진 경우 질량유량은 29.3%, 연기층높이는 27.1% 감소되었다. 화재크기가 3배로 커진 경우 질량유량은 38.7% 증가하나 연기층높이는 39.8% 감소하였다. 즉 배연성능은 화재크기와 풍속의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 미국 NFPA 204 기준에 의해 설계된

단일공간의 수직 배연구에 대하여 배연구의 위치, 외기 온도, 풍속, 화재크기가 자연배연 성능에 미치는 영향과 화재특성을 수치해석적으로 조사하였다.

배연설비의 배연성능과 관련하여 배연구의 배출량과 외기유입구의 유입량 및 제연구역내 연기층의 높이에 대한 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배연구는 외벽 상부에 위치할 경우 배연성능기준을 만족한다.
- 2) 외기 온도가 높은 여름철의 경우 배연성능기준을 만족하지 않을 가능성이 있다.
- 3) 화재모델 No. 3 기준시 화재모델 No. 9($V_{wind}=5$ m/s)의 질량유량과 연기층높이는 각각 29.3%와 27.1% 감소하였다.
- 4) 화재모델 No. 3 기준시 화재모델 No. 11($HRR=5250$ kW)의 질량유량은 38.7% 증가하고, 연기층 높이는 39.8% 감소하였다.

직접 외기와 통하는 수직 배연구는 배연량이 최대가 되도록 수직외벽의 최고 상부에 설치하여야 한다. 또 항상 수직 배연구의 배연성능을 보증할 수 있도록 설계시 여름철 최고 온도 및 최대 풍속을 고려하여야 한다. 특히 성능위주 설계시 설계화재는 배연구의 성능에 가장 큰 영향을 미치므로 배연성능에 문제가 발생하지 않도록 정확히 결정되어야 한다.

기호설명

- A_i : air inlet area [m²]
 A_v : vent area [m²]

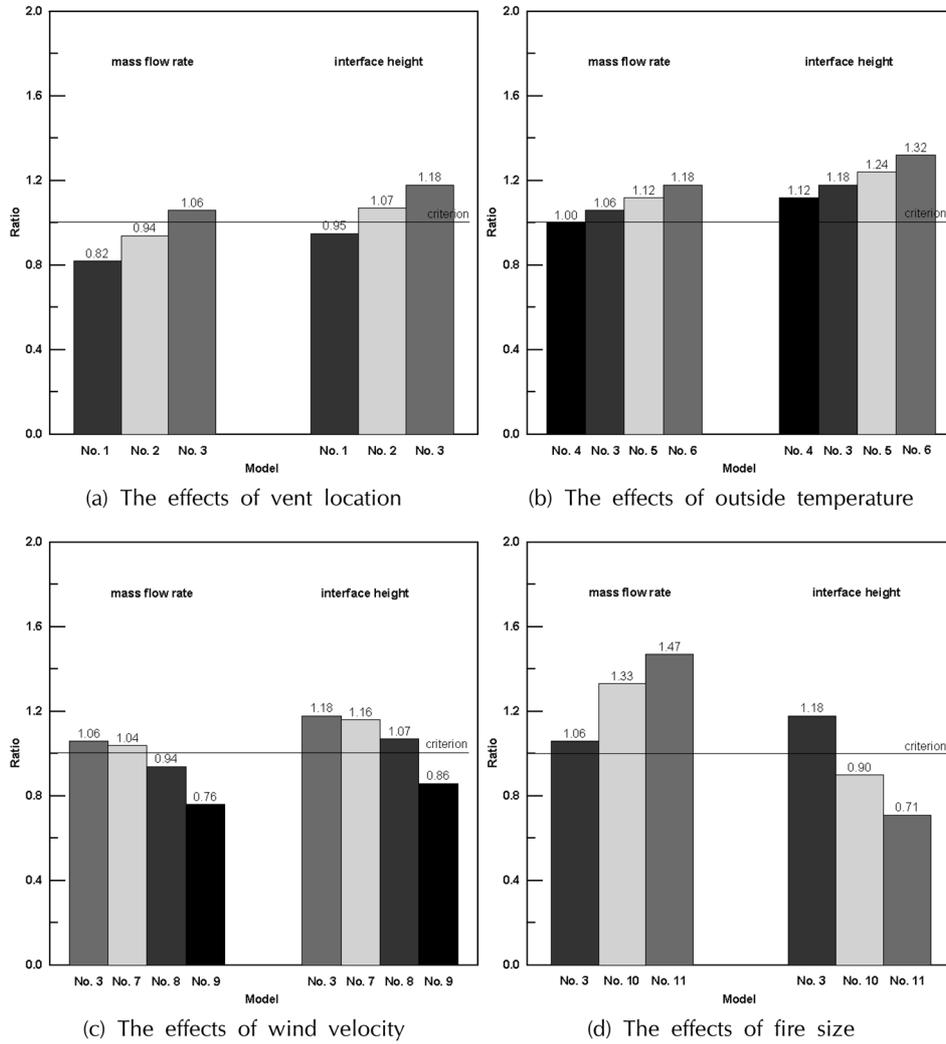


Figure 8. The ratios of mass flow rate and interface height to criterion ($\frac{\dot{m}_{v,i}}{\dot{m}_c}, \frac{z_s}{z_c}$).

- | | |
|--|---|
| C_d : discharge coefficient | \dot{Q}_c : convective heat release rate [kW] |
| d_s : smoke layer depth [m] | Q_v : volume flow through vent [m^3/s] |
| g : gravitational acceleration [m/s^2] | T_a : ambient temperature [K] |
| L : mean flame height [m] | V_v : velocity through vent [m/s] |
| \dot{m}_c : the criterion of mass flow rate [kg/s] | z_c : criterion of interface height of smoke layer [m] |
| \dot{m}_p : mass flow rate in the plume [kg/s] | z_o : height of virtual origin of fire plume [m] |
| \dot{m}_v : mass flow rate through vent [kg/s] | z_s : interface height of smoke layer [m] |
| $\Delta P(z)$: the pressure difference of both sides of the vent at elevation z [kPa] | z_B : height of compartment bottom [m] |
| P_i : inside pressure [kPa] | z_T : height of compartment top [m] |
| P_o : outside pressure [kPa] | ρ_a : ambient density [kg/m^3] |
| | ρ_v : density of the vent flow at elevation z [kg/m^3] |

참고문헌

1. ASHRAE, '1999 ASHRAE Application Handbook ; Chapter 51 Fire and Smoke Management', ASHRAE, pp. 51.1-51.6(1999).
2. 백열선, '소방기계설비', 형설출판사, pp.555-562(2005).
3. Leonard Y. Cooper, 'SFPE Handbook, Section 3, Chapter 9, Smoke and Heat Venting', SFPE, pp.222 (2002).
4. Qing Tan and Yogesh Jaluria, 'Flow through horizontal vents as related to compartment fire environments', NIST-GCR-92-607, pp.1-89(1992).
5. Leonard Y. Cooper, 'Calculation of the flow through a horizontal ceiling/floor vent', NISTIR 89-4052, pp.1-25(1989).
6. S.H.-K. Lee, W. K.-S. Chiu and Y. Jaluria, 'Experimental study of enclosure fires with horizontal vents', Combustion institute/Eastern states section, technical meeting, pp.327-330(1993).
7. Abib, A. H. and Jaluria, 'Numerical simulation of the buoyant-induced flow in a partially open enclosure', Numerical heat transfer, Vol.14, pp.235-254(1988).
8. Rodney A. Bryant, 'Particle image velocimetry measurements of buoyancy induced flow through a doorway', NISTIR 7252, pp.1-65(2005).
9. 조동훈, 권영진, 우성천, 이종권, 차시환, 편석범, '2007 소방관계법규', 동화기술, pp.103-105(2007).
10. Leonard Y. Cooper, 'SFPE Handbook, Section 3, Chapter 9, Smoke and Heat Venting', SFPE, pp.219 (2002).
11. Fu, Z.; Kashaf, A.; Benichou, N.; Hadjisophocleous, G., 'Smoke Movement Model', IRC, pp.23-27(2002).
12. Howard W. Emmons, 'SFPE Handbook, Section 2, Chapter 3, Vent Flows', SFPE, pp.36(2002).
13. NFPA, 'NFPA 204 Standard for Smoke and Heat Venting 2002 Edition', NFPA, pp.11-12(2002).
14. 조동훈, 권영진, 우성천, 이종권, 차시환, 편석범, '2007 소방관계법규', 동화기술, pp.526-528(2007).
15. NFPA, 'NFPA 204 Standard for Smoke and Heat Venting 2002 Edition', NFPA, pp.18-19(2002).