

# 화재 시 환기유동량의 계산방법

## 개 요

화재 시에는 매우 많은 양의 열이 방출되어 고온 가스의 팽창을 유발시키며, 실내화재에서 일어나는 가스팽창은 가스의 일부를 실외로 밀어내게 된다. 가스가 발화실 밖으로 나갈 수 있도록 통로 역할을 하는 개구부 (출입문, 창문, 덕트, 배관 등 관통부 주위 등)를 환기구(vent)라고 하며, 방이 완전 밀폐상태일 경우, 비교적 소규모 화재에도 내부 압력이 상승하여 출입문이나 창문, 벽체 등이 파괴될 수 있다.

가스에 작용하는 유일한 힘은 가스 압력과 중력이며, 중력은 수직방향으로 작용하기 때문에 바닥이나 천장의 구멍을 통해서만 가스 유출입이 일어날 것으로 생각할 수도 있지만 수평방향의 압력변화를 발생시킬 수도 있다. 중력에 의해 직간접적으로 발생하는 가스 유동을 부력 유동이라고 한다.

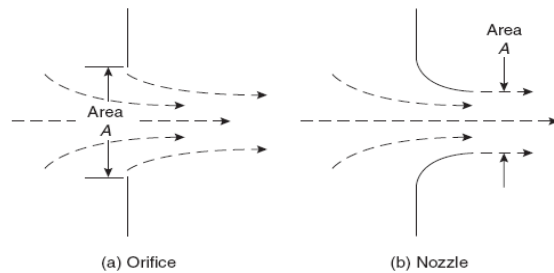
환기구 양 측 사이에 차압이 존재할 경우, 유체는 환기구를 통해 밀려나가도록 힘을 받게 되고, 화재 등에 관련 환기유동량을 공학적으로 계산 시 수력학적 방식을 이용하면 충분한 정확성을 확보할 수 있다.

## 비부력유동에 대한 계산방식

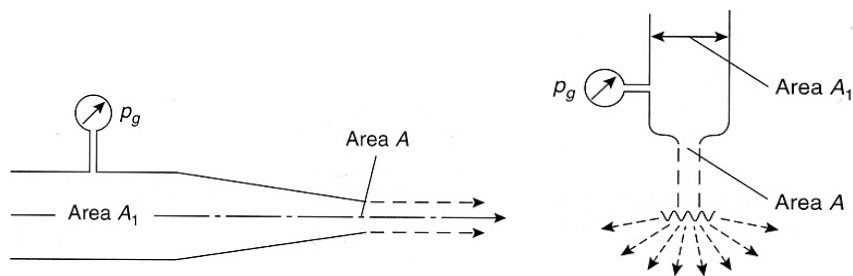
환기구(단면적 A) 입구 및 출구 양측 간에 압력강하  $\Delta p = p_1 - p_2$ 가 존재하고, 유체밀도가  $\rho$ 라면 환기구를 통과하는 유동량은 다음 (1) (2) (3)식으로 구할 수 있고(그림 1 참조), 물을 방사하는 호스 또는 스프링클러헤드에서 단면적  $A_1$ 인 노즐 입구측 게이지압력이  $p_g$ 인 경우 (1) (2) (3)식에 (4)식을 추가 이용하여 유동량을 구한다. (그림 2 참조)

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \dots\dots\dots (1), \quad Q = CA\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \dots\dots\dots (2), \quad \dot{m} = CA\sqrt{2\rho\Delta p} \dots\dots\dots (3)$$

$\Delta p$  : [Pa=N/m<sup>2</sup>], A : 환기구 단면적 [m<sup>2</sup>],  $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>], V : 유속 [m/s], Q : 체적유량 [m<sup>3</sup>/s],  $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/s], C : 유동계수 이다.



[그림 1] 오리피스와 노즐 (대부분의 화재 환기구는 오리피스에 해당)



[그림 2] 호스 노즐 및 스프링클러 노즐

$$\Delta p = \frac{6,895 p_g}{1 - (A/A_1)^2} \dots\dots\dots (4)$$

대기 중에서는 지면에서의 압력이  $p_a$ 이며, 공기 밀도가  $\rho_a$ 라면, 높이  $h$ 에서의 압력  $p$ 는  $p_a$ 에 비해 높이  $h$ 에 해당하는 공기 중량만큼 그 값이 작다.

$$\Delta p = p_a - p = \rho_a g h \dots\dots\dots (5)$$

연소가스에 대해 상기 제시된 속도 및 유량식에 주위 공기의 길이(m)로 나타낸 압력수두  $h = \Delta p / \rho_a g$ 를 이용하면 편리할 때가 많다.

압력강하가 크다면, 관련 식의 형태가 더욱 복잡해지며, 환기구 입구측 압력 및 밀도가  $p_1, \rho_1$ 이고 환기구 출구측 압력이  $p_2$ 라면, 유속 및 질량유량 식은 다음과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{2p_1}{\rho_1}} \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\gamma} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right)^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

$$\dot{m} = CA \sqrt{2\rho_1 p_1} \left[ \frac{\gamma}{\gamma-1} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\gamma} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right]^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \text{ (연소가스의 경우 } \gamma = 1.33 \sim 1.40 \text{)}$$

질량유량은

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \dots\dots\dots (8)$$

$\gamma = 1.40$ 일 경우, 환기구 출구측 유량이  $p_2 = 0.528 p_1$ 일 때 최대에 이르게 되며, 배압(back pressure)이 더 작은 모든 경우에는 항상 유량이 최대값을 유지한다.

$$\dot{m} = CA \sqrt{\rho_1 p_1} \left[ \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)(\gamma-1)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

실험을 통해 구하는 유동계수는 유체 점성, 환기구 전체에 대한 속도 불균일성, 난류 및 열 전달, 노즐 형상, 압력측정지점 등의 영향 관련 식을 보정하는 역할을 한다. 주어진 임의의 환기구 형상에 대한 가장 중요한 계수보정은 레이놀즈수  $Re$  (무차원수)이다.

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \dots\dots\dots (10)$$

V = 유체의 속도

D = 노즐 혹은 오리피스의 직경

$\rho$  = 환기구에 접근하는 유체의 밀도

$\mu$  = 환기구에 접근하는 유체의 점성계수

출입문 및 창문형 환기구는 거의 직사각형이므로, 레이놀즈수에 사용되는 D는 수력 직경이 된다.

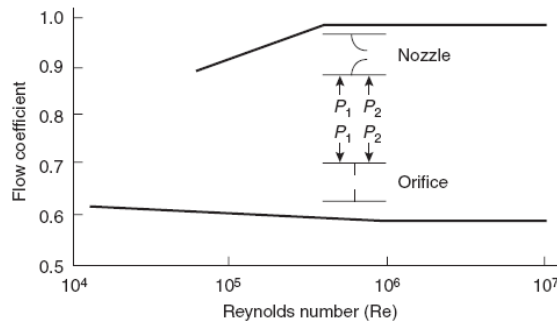
$$D = \frac{4A}{P} \dots\dots\dots (11)$$

A : 환기구 단면적

P : 환기구 둘레 길이

직사각형 환기구의 경우, A = a (가로) × b (세로)이고, P = 2 (a + b)이다.

$$D = \frac{2ab}{a + b} \dots\dots\dots (12)$$



[그림 3] 오리피스 및 노즐의 유동계수

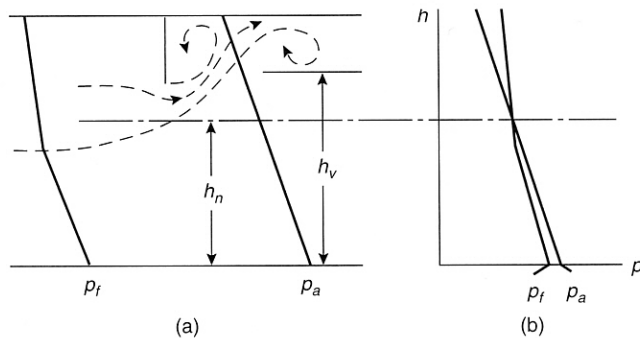
대부분의 화재에서 레이놀즈수는 약 10<sup>6</sup>으로 적용하며, 대부분의 경우 유동계수(C)는 노즐은 0.98이고, 오리피스는 0.60으로 설정할 수 있다.

**수직 환기구를 통과하는 부력 유동**

실내에서 화재가 발생할 경우, 실내 공기의 가열로 공기가 팽창하게 되면서 주변 공기가 환기구를 통해 밀려나가고, 고온 공기는 연소생성물 및 연기와 함께 플룸(plume) 형태로 천장까지 상승한다. 천장의 고온 가스층 두께가 증가해 환기구 상단에 이를 경우, 고온 가스 중 일부가 환기구를 통해 유출된다. 화재가 성장함에 따라 실내를 빠져나가는 부력 유량이 화재에 의한 가스 팽창을 앞지르게 될 것이다. 이로 인해 발화실 내부의 바닥 압력은 대기압력 아래로 강하되고 외부 공기가 바닥으로 유입된다. 이러한 부력 유동 메커니즘은 화재를 지속시키는데 꼭 필요한 새로운 공기를 끌어들이게 된다. 부력 유동이 발생하기 위해서는 환기구 양측 사이에 차압이 존재해야 하고, [그림 4]에서는 이러한 차압이 어떻게 발생하는지를 보여주고 있다. 바닥에서의 차압은,

$$\Delta p_f = p_f - p_a \dots\dots\dots (13)$$

$p_f$  = 환기구 앞의 실내 바닥 압력,  $p_a$  = 환기구 바로 밖의 실외 바닥 높이에서 압력



[그림 4] 압력구배: (a) 출입문의 양 측면, (b) '압력 대비 높이 그래프'에 중첩시킨 그래프

높이 y에서의 압력은 바닥보다 낮으며 다음의 정수압 식을 이용해 구할 수 있다.

실내:  $p_1 = p_f - \int_0^y \rho_1 g dy$  ..... (14)      실외:  $p_2 = p_a - \int_0^y \rho_2 g dy$  ..... (15)

높이 h에서의 차압은,

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \Delta p_f + \int_0^h (\rho_2 - \rho_1) g dy$$
 ..... (16)

실외 밀도  $\rho_2$ 는 실내 밀도  $\rho_1$ 보다 크므로 적분 결과는 양수 값이므로  $\Delta p$  값은 환기구 상단에서 양수(유출) 값을 갖고 환기구 하단에서 음수(유입) 값을 갖는 경우가 많다.

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$
 ..... (17)       $\frac{Q}{A} = C\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$  ..... (18)       $\frac{\dot{m}}{A} = C\sqrt{2\rho\Delta p}$  ..... (19)

### 화재시험 시 환기구 유량 측정방법

$\rho$  및  $\Delta p$  값을 구하여 [식 19]를 이용하기 위해 단순성, 정확성 및 비용 등을 고려하여 다음의 4가지 방법을 이용할 수 있다.

**[방법 1]:** 압력계를 이용하여 환기구 평면상에서 동적 압력분포를 측정할 수 있다. 차압은 대부분 바닥( $p_f$ ) 및 천장( $p_c$ ) 간의 대기압 차이보다 작으며, 높이가 2.5m인 실내화재에서의 대기압의 차이와 분율 및 부력유동속도를 계산하면 다음과 같다.

$$p_f - p_c = \rho_a g H = 1.176 \times 9.81 \times 2.5 = 28.84 \text{ Pascals (3.0 mmH}_2\text{O)}$$

$$\frac{p_f - p_c}{p_a} = \frac{28.84}{101,325} = 0.00028$$

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \times 28.84}{1.176}} = 7.00 \text{ m/s (23 ft/s)}$$

연소가스 혼합기체의 분자량은 공기분자량과 거의 같거나 약간 큰 편이고, 건축물 전체에 대한 압력 변화량은 매우 작아서 가스밀도에 미치는 영향은 무시할 수 있으므로 기체의 밀도는 주로 온도 (화재 중에 4배까지 변화할 수 있음)에 의해 결정된다. 즉,

$$\rho = \frac{352.8}{T} \frac{kg}{m^3} \dots\dots\dots (20)$$

환기구 내부 유동은 실내 고온 층 내부의 온도분포를 그대로 반영하고 있다. 고온 층 온도분포는 일반적으로 층화되어 있으므로 주로 천장으로부터 거리에 따라 변화하며, 환기구의 수직 방향 속도분포는 다음과 같다.

$$V = 0.93 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \dots\dots\dots (21)$$

여기에서  $\rho$ 는 양방향 프로브에 대한 보정계수 0.93과 함께 환기구 내의 온도분포를 이용해 [식 20]으로부터 구하여 유용한 형태의 다음 관계식을 얻게 된다.

$$V = 0.070 \sqrt{T\Delta p} \quad \Delta p \left( \frac{N}{m^2} \right) \quad V = 5.81 \sqrt{T\Delta p} \quad \Delta p \left( \frac{lb}{in^2} \right) \dots\dots\dots (22)$$

초기의 실내 화재를 제외하고는 상단에서 유출이 형성되고( $V, \Delta p > 0$ ), 하단에서 유입이 형성된다. ( $V, \Delta p < 0$ ) 따라서 환기구 내에서  $V = 0$ 인 위치(내부 압력이 외부 압력과 동일해지는 수직 위치)가 존재하게 되고( $h_n$  : 중립축), 환기구 밑면 높이를  $h_b$  ( $h_b =$  출입문의 경우 0), 그리고 환기구 밑틀을  $h_t$ 로 정의하면, 다음 식을 통해 환기구 유량이 주어진다.

$$\text{유출유량 } \dot{m}_u = 16.79 \int_{h_n}^{h_t} b \sqrt{\frac{\Delta p}{T_V}} dy \quad (kg/s) \dots\dots\dots (23)$$

$$\text{유입유량 } \dot{m}_i = 16.79 \int_{h_b}^{h_n} b \sqrt{\frac{\Delta p}{T_V}} dy \quad (kg/s) \dots\dots\dots (24)$$

**[방법 2]:** 다소 단순하지만, 정확도가 떨어지는 환기유량측정법으로서 이 방법을 이용하기 위해서는 바닥에서의 차압을 측정해야 한다.

$$\Delta p = \Delta p_f + 3,461 \int_0^y \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) dy \dots\dots\dots (25)$$

대부분의 화재에 대해  $\Delta p_f$ 는 음수 값을 갖는다.(표준 크기의 환기구가 설치된 발화실에만 해당) 완전 밀폐된 방의 경우, 발화실 내부의 압력은 외부보다 높으므로, [식 25]로부터 구해지는  $\Delta p$  (음수)값은 높이가 증가함에 따라 절대값이 작아지다가, 중립축에서 0이 되고(양수) 높이가 증가할수록 양수 값이 증가한다.

압력분포를 계산하기 위해서는 환기구의 내부( $T_1$ ) 및 외부 ( $T_2$ ) 온도분포를 측정해야지만, 유량계산을 위해서는 환기구 자체의 밀도분포에 대한 정보가 필요하다. 따라서 환기구 내의 온도분포  $T_V$ 를 측정하기 위해 제3의 열전대의 열이 필요하고, 필요한 유동 특성은 다음과 같이 구해진다.

$$\text{속도 } V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = 4.43 \sqrt{T_V \int_{h_n}^y \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) dy} \quad (m/s) \dots\dots\dots (26)$$

$$\text{유출유량 } \dot{m}_u = \int_{h_n}^{h_t} \rho b V dy = 1063 \int_{h_n}^{h_t} b \left( \frac{1}{T_V} \int_{h_n}^y \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) dy \right)^{1/2} dy \dots\dots\dots (27)$$

$$\text{유입유량 } \dot{m}_u = C \int_{h_b}^{h_n} \rho b V dy = 1063 \int_{h_b}^{h_n} b \left( \frac{1}{T_v} \int_{h_b}^y \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) dy \right)^{1/2} dy \dots\dots\dots (28)$$

$b$  = 높이  $y$ 에서 환기구 폭

$\Delta p$  = 발화실 내부 및 외부의 온도 및 밀도를 이용해 [식 16]으로부터 계산한 수치

$\rho$  = 환기구 내부 온도로부터 계산한 밀도

**[방법 3]:** 시험 중에 환기구 내부의 유출 유동의 바닥을 시각적으로 환기구 내에 위치시킴으로써 고감도 압력계의 사용을 피할 수 있으며, 이 지점은  $\Delta p = 0$ 이 되는 중립축  $h_n$ 의 위치에 해당한다. [방법 3]은 중립축의 위치를 압력으로부터 유추하지 않고 실험으로부터 직접 구한다는 점만 제외하고 [방법 2]와 동일하다. 환기구의 압력강하분포는 [식 16]을  $h_n$  상부( $\Delta p > 0$ ) 및 하부( $\Delta p < 0$ )에 대해 내부( $\rho_1$ ) 및 외부( $\rho_2$ ) 밀도분포를 이용해 적분해서 구한다. 유동 특성은 [식 26] 내지 [식 28]로부터 구한다.

**[방법 4]:** 단순하지만 정확도가 다소 떨어지는 방법으로 발화실 내부의 고온층 가스밀도( $\rho$ )와 하부의 저온층 밀도( $\rho_a$ )가 거의 균일하게 분리된다고 가정(그림 5 참조)을 하고, 관련 유동식은 다음과 같다.

$$\text{유출 유속 } V_u = \left( 2g \frac{\rho_a - \rho}{\rho} y \right)^{1/2} \dots\dots\dots (29)$$

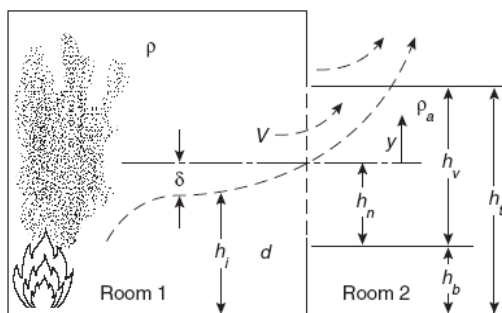
$y$  : 중립축부터 유출 상단부까지의 거리

$$\text{유출 유량 } \dot{m}_u = \frac{\sqrt{\delta}}{3} C b \sqrt{g \rho (\rho_a - \rho)} (h_v - h_n)^{3/2} \dots\dots\dots (30)$$

이 2-층 방법에 의한 유입 유동은  $d$ (작은 값을 갖고 있으며, 발화실 내부의 가스 운동의 영향으로 인해 그 값을 충분히 정확하게 구할 수 없음)에 따라 결정된다.

중립축의 위치는 (1) 시험 중 시각이나 사진을 이용해 중립축의 위치를 구할 수 있으며, (2) 환기구 하단에서 상단까지 가장 급속한 온도 상승이 일어나는 지점 바로 밑의 위치를 구하는 방식으로, 환기구 온도분포로부터 중립축의 위치를 구할 수 있다.

2-층 모델의 하부층 온도  $T_d$ 는 환기구 하단 바로 위의 가스온도로, 상부층 온도  $T_u$ 는 2-층 모델의 총 환기질량 (즉, 동일 평균밀도)이 실제 유동의 경우와 동일해 지도록 선정한다.



[그림 5] 창문을 통해 발화실을 빠져 나가는 부력 유동

$$\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{1}{h_v} \int_0^{h_v} \frac{dy}{T} = \frac{h_n}{h_v T_d} + \frac{h_v - h_n}{h_v T_u} \dots\dots\dots (31)$$

밀도  $\rho_a$  및  $\rho$ 는 [식 20]으로부터 각각  $T_a$  및  $T_u$ 로부터, 유출 속도 및 질량유량은 [식 29] 및 [식 30]으로부터 구한다.

가스 유출속도는 유입속도에 가연물 기화량을 더한 수치와 동일하다. 즉,

$$\dot{m}_d = \dot{m}_u \left( \frac{1 + y_{O_2} \lambda}{1 + 0.23 \lambda} \right) \dots\dots\dots (32)$$

$\lambda$  : 유효 가연물-공기의 비

부력유동계수는 0.68이며, 비부력유동 (노즐 및 오리피스)의 경우, 유동계수의 오차는 1% 미만이며, [그림 3]에서와 같이 레이놀즈수의 함수로 제시되어 있고, 유동 계산과 관련해 현재 활용할 수 있는 최선의 방법은  $C = 0.68$ 을 적용하고  $\pm 10\%$ 의 오차를 기대하는 것이다.

상기에 제시된 4가지 방법을 적용하기 위해서는 유출되는 상부와 유입되는 하부 사이의 분리선인  $h_n$ 을 알고 있어야 하고, 실험을 하지 않고  $h_n$ 을 계산할 수 있는 간단한 식이 있다면 유용할 것이다.  $h_n$ 을 결정하는 요인은 무엇인가?

초기화재에는 플룸(plume) 형태의 가열된 가스가 천장 쪽으로 가게 되고 가스 팽창을 통해 일부 가스를 환기구 밖으로 밀어내어 고온 플룸 가스는 천장에 거의 축적되지 않으며, 일부 축적된다 하더라도 환기구를 통해 유출되어 버린다. 일정 시간(방의 크기에 따라 결정됨)이 지나면, 고온층의 깊이가 상당히 커져 그 하부 표면이 환기구 상단 아래까지 내려오게 되면 고온 가스의 유출이 시작된다.

두 번째 방으로 화재가 확산되면, 중간 환기구의 양 편에 고온층으로 인해 중간 환기구 양 편에 2개 층이 형성되면서 방1의 상하부 밀도  $\rho_{a1} > \rho_1$ 과 방 2의 상하부 밀도  $\rho_{a2} > \rho_2$  등 4가지 가스밀도가 존재하고, 개구부 하단 높이  $h_b$  (출입문인 경우 0), 개구부 밀면 높이  $h_t$ , 방 1의 경계면 높이  $h_{n1}$  및 방 2의 경계면 높이  $h_{n2}$  등 4가지 높이가 존재하며, 이들 8개의 값에 따라 여러 가지 유동상황이 발생할 수 있다.

각 방의 바닥에서부터 천장까지의 압력 변화는 해당 방 내부의 층 높이 및 밀도에 따라 달라지며, 2개 방 간의 차압은 각 방 내부의 화재, 모든 개구부와 특히 두 방을 연결하는 중간 환기구의 특성에 따라 정해지는 어떤 값을 가질 수 있다. (그림 6 참조)

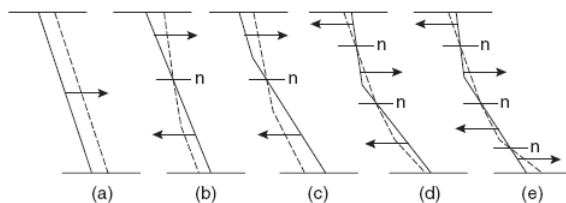
[그림 6]에서, (a)의 경우에는 고온층이 존재하지 않고 방1 내부 압력이 모든 높이에서 방2보다 높으며 유동방향은 모든 위치에서 방1에서 방2를 향하게 되고, (b)의 경우에는 방2의 밀도는 균일하고 방1의 고온 층 및 바닥 차압으로 인해 상부에서는 유출 유동이 발생하고 하부에서는 유입 유동이 발생하며 방 내부의 고온-저온 경계면 약간 위에는 하나의 중립축이 존재한다.

(c)의 경우에는 유동상황이 (b)와 유사하지만, 양쪽 방에 고온층이 존재하는 점이 다르다. (중립축 위치는 방1의 경우 경계면 위이고 방2의 경우 경계면 아래임)

(d)의 경우에는 (c)의 경우와 밀도 특성(압력분포곡선의 기울기)이 다소 다르며,(방2 내부의 고온층이 다소 얇으면서 온도는 방1보다 더 높음) 이로 인해 2개의 중립축이 존재하게 되고 상단에는 작은 유입 층이 새로이 형성되면서 총 3개의 유동층(2개의 유입 유동 및 1개의 유출 유동)이 존재하게 된다.

(e)의 경우에는 밀도 및 바닥 높이 차압으로 인해 2개의 유출 및 2개의 유입 등 4개의 유동층이 3개의 중립축과 함께 존재하게 된다.

이러한 다섯 가지 사례가 발생 가능한 모든 환기유동상황을 표현한 것은 아니다.



[그림 6] 2-층 환기구압력강하분포 (점선 : 방1의 압력분포 / 실선 : 방2의 압력분포)

2-층 유동상황에 대한 상기의 논의 내용은 화재에 대한 존 모델링에 있어서 매우 중요성이 크며, 현재까지 개발된 화재모델은 모두 2-층 모델이다(3-층 이상의 화재모델은 [그림 6]에 제시된 경우보다 훨씬 복잡한 환기유동을 발생시킴). [그림 6]의 (d)와 (e)는 존 모델을 이용한 화재 계산은 화재성장에 있어서 그리 중요성이 크지 않지만, 이러한 상황이 발생할 수 있으므로 화재 계산을 통한 처리 (즉, 층별 유동 계산)가 필요하다.

[식 16]에 바닥압력강하 및 환기구 각 방향의 방 밀도를 대입하면, 모든 층 및 개구부 상/하단, 경계면, 그리고 중립축의 위치  $h_i$ 를 구할 수 있고, 각 층의 바닥압력강하  $\Delta p_j$ 와 상단압력강하  $\Delta p_{j+1}$ 를 알 수 있다. 방 밀도는 각 방의 층별로 일정하므로 환기구 압력강하는  $\Delta p_j$ 에서  $\Delta p_{j+1}$ 까지 선형적으로 변화한다. 방1에서 방2로 향하는 각 층의 유량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_i = (sign \alpha) C \frac{\sqrt{8}}{3} b (h_{j+1} - h_j) \sqrt{\rho} \times \left( \frac{|\Delta p_j| + \sqrt{|\Delta p_j \Delta p_{j+1}|} + |\Delta p_{j+1}|}{\sqrt{|\Delta p_j|} + \sqrt{|\Delta p_{j+1}|}} \right) \dots\dots\dots (33)$$

$$\alpha = \left( \frac{\Delta p_j + \Delta p_{j+1}}{2} \right) \text{ 이 식의 부호가 유동의 유출/유입 결정}$$

$\rho$  = 유동 층  $i$  내부에 흐르는 가스의 밀도

이러한 유량 계산은 복잡하게 보일 수도 있지만, 컴퓨터를 이용할 경우 쉽게 코드화가 가능하며 예상할 수 있는 모든 사례를 계산할 수 있다.

이제 모든 환기유동을 계산할 수 있지만, 화재모델링을 위해서는 방에 진입하는 시점에 대한 각 가스 유동층의 경로가 필요하다.

2-층 모델이 유지되려면 각 유입 유동이 고온층 혹은 저온층과 혼합되거나 2개 층 사이에서 분리되어야 한다.

### 수평 환기구를 통과하는 부력 유동

오리피스를 통과하는 비부력유동이나 수직 벽체상의 환기구를 통과하는 유동과 달리, 수평 표면(바닥 혹은 평탄한 지붕)이나 약간 경사진 표면(경사 지붕) 상의 환기구를 통과하는 유동에 대해서는 정량적인 연구가 거의 이루어지지 않았기 때문에 이와 관련된 내용은 더 이상 설명하지 않는다.



## 환기유동량 계산의 정확성

비부력유동의 경우, 2%의 오차(98%의 정확도)를 충분히 달성할 수 있다. (이미 알고 있는 레이놀즈수 범위에 대해 특정 형상으로 제작 및 보정된 직선 배관 상의 노즐 혹은 오리피스 사용) 이처럼 [식 1] 내지 [식 9]는 높은 정확도를 갖고 있다.

실내 연소가스의 순환이 제한적인 방에 설치된 수직 벽체 환기구의 경우, 최선의 측정결과에 대한 오차는 5% 정도 이지만, 실제 화재의 경우에는 유도 순환의 강도가 크고 해당 수치를 모르는 경우가 많으므로 10% 이상의 오차를 예상해야 한다. 환기구 자체에 유량측정장치가 설치된 경우에도 환기구 표면 전체에 대한 변화와 발화실 내부의 화재 현상으로 인해 발생하는 시간에 따른 변동을 충분히 반영할 수는 없다.

수평 표면상의 환기구에 대해서는, 정확도를 전혀 알 수 없으며, 작은 구멍을 이용한 물-소금 물 실험에서의 오차는 10%이지만, 실제 화재에서의 오차는 훨씬 더 높을 것이다. 이에 해당하는 일반적인 경우에는, 하부의 화염으로 인해 천장이 불타면서 구멍이 생기고, 이러한 구멍의 형상은 매우 불규칙적이고 전혀 알 수 없다. 아울러 이러한 구멍 바로 아래의 화재는 상당히 빠른 속도로 고온 가스를 공급하게 된다. 또한 천장 분출유동은 상당한 양의 십자류(cross flow)를 발생시키는 경우가 많다.

화재의 순환, 큰 밀도 비, 그리고 큰 레이놀즈수 등의 영향을 결정하기 위한 실험규모 실험 결과가 필요하다.

## 건축물 유동망의 일부로서의 환기구

건축물은 하나의 밀폐공간으로서, 여러 개의 층과 함께 수직 및 수평방향으로 공간을 분할하여 여러 개의 방, 복도 및 계단 등을 형성하도록 하는 벽으로 이루어진 경우가 많다. 건축물 내의 임의의 장소에서 발화된 화재는 가스의 팽창으로 국소 압력을 상승시켜 외부로 연결되는 모든 경로를 통해 건축물 도처에 걸쳐 공기를 밀어낸다. 발화실 내부에 창문이 열려 있고, 바람이 거의 불지 않을 경우에는 건축물 나머지 다른 부분으로 이동되는 유량은 거의 없다. 개방상태의 창문이 없는 경우에는 건축물 내의 임의의 위치에 존재하는 균열 및 유출 통로를 향해 유동이 발생한다. 이러한 모든 유동은 초기에 부력을 갖고 있지 않다. 건축물을 통과하는 유동은 복잡한 배관 및 오리피스 계통을 통과하는 유동으로 볼 수 있다. 화재의 규모가 성장함에 따라 부력에 의해 고온 가스가 발화장소를 빠져 나가고, 그 밑으로 저온 가스가 유입된다.

순 유량 (유출량 - 유입량)이 연소가스 팽창을 겨우 수용할 수 있을 경우, 고온가스 유출의 실제 체적유량은 유입 유량의 2.5배에 해당할 수도 있다. 서로 연결되어 있는 여러 공간의 천장을 따라 고온가스 층이 이동하다가 계단이나 기타 천장 (지붕) 개구부를 따라 상부 구역으로 유입된다. 고온가스의 축적은 화재의 확산을 돕고 새로이 형성된 고온 연소 가스는 인접 공간에 새로운 고온층을 형성한 다음, 이미 논의한 바 있는 여러 상황 전개를 통해 각 환기구 양 측면에서 발생하는 유동 및 압력강하가 진행된다. 따라서, 건축물 전체에 걸친 유동량은 화재 실로부터 건축물 외부까지 이용될 수 있는 모든 유동 경로를 따라 존재하는 환기구 및 유동 마찰손실에 의해 결정된다.

참고문헌 : SFPE 방화공학핸드북 (CHAPTER 2-3, Vent Flows)

작성 : 위험조사부