

건물화재시 연소가스의 유동

Fire-induced flow in building fires

김 서 영
S. Y. Kim

한국과학기술연구원 공조환경제어연구팀



- 1966년생
- 공조시스템 내의 가스유동, 열 및 물질전달에 관심을 가지고 있다.

강 병 하
B. H. Kang

한국과학기술연구원 공조환경제어연구팀



- 1958년생
- 냉동·공조시스템에서의 열전달에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

인간이 주거지에서 불의 사용법을 터득한 이후로 건물화재는 가장 두려운 재앙의 하나가 되어왔다. 문명이 발달하고 주거 및 사무용 건물이 고층화, 대형화됨에 따라 현대의 초고층 건물에서의 화재를 효과적으로 방재하여야 할 필요성은 날로 증대되고 있다. 특히 초고층 건물은 화재가 발생한 경우에 비상계단 등의 외부 피난로가 없기 때문에 내부 피난로를 통한 피난이 용이하지 않으면 그야말로 대 참사가 발생하기 쉬우며, 지상에서는 바람이 없어도 고층에서는 반드시 대기의 유동이 있어 외부의 공기(산소)를 용이하게 빨아들여 연소가 촉진되며 독성연소가스를 건물 전체에 확산시키고 피난과 소화를 더욱 어렵게 한다.

최근에 불연내장재를 사용하는 건물이 많아짐에 따라 화염에 의한 화상 등의 직접적인 피해는

감소한 반면 일산화탄소 중독이나 질식사 등의 피해가 증가하는 추세이며 실제로 건물화재시 사망요인의 50~75%가 독성 연소가스의 질식에 의한 것으로 알려지고 있다. 건물내장재 및 가구 등의 연소로 인하여 발생하는 독성가스로는 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 시안화수소(HCN), 아크롤레인(Acrolein) 등 여러 가지이며 이중 일산화탄소가 산소의 공급이 부족할 경우에 가장 많이 발생한다. 이산화탄소는 일산화탄소와 같은 독성은 없으나 화재시 다량의 이산화탄소가 발생되고 공기 중에 2% 정도의 농도를 가질 경우에도 인체의 호흡률을 50% 이상 상승시켜 또 다른 독성 연소가스의 중독을 쉽게 일으키게 하여 위험하다⁽¹⁾.

건물화재시 이러한 연소가스에 의한 피해를 최소화하고 대피를 용이하게 하기 위하여 소방법규상에도 복도, 계단 및 건물내장재 등에 대한 규제가 따른다. 그러나 현대의 건물은 미적 감각

및 폐적성 등을 염두에 둔 대공간형의 설계가 주류를 이루고 있어 독특한 형태의 대공간에 대한 화재방재를 위해 종래의 방재방법이나 소방법규상의 지침만으로는 해결할 수 없는 면이 많다. 최근 일본의 신공항 설계에 있어서도 대공간 부분은 방화공학(fire protection engineering)을 이용한 연기강하 및 확산시간의 분석에 의하여 허용 대피시간을 설정하고 대공간 이외의 구역에 대해서만 건축 방재지침을 따랐다고 보고되고 있다⁽²⁾. 따라서 대형화, 초고층화되고 있는 현대식 건물내의 화재 성장억제와 안전한 대피경로의 확보를 위해서는 연소가스의 확산에 관한 유체역학적인 지식을 통한 가스확산의 능동적인 제어가 필수적으로 요구된다고 할 수 있다. 본 고에서는 현대식 초고층건물의 화재시 그 중요성이 크게 부각되고 있는 독성 연소가스의 건물내 확산억제를 위하여 벤트(vent)를 통한 가스유동에 관한 내용을 소개하고자 한다.

2. 벤트(vent)를 통한 가스의 유동

건물에 화재가 발생하면 건물내장재의 연소에 의해 막대한 양의 열이 방출되어 실내의 가스가 팽창하고 실외로 연소가스를 배출한다. 이때 연소가스가 실외로 흘러 나갈 수 있는 통로를 흔히 들 벤트(vent)라 한다. 건물화재시 벤트는 일반적으로 문과 창문 및 계단, 엘리베이터 통로(shaft) 등을 들 수 있다. 환기구 역시 가스배출의 주요 통로가 되며 실내의 문이나 창문이 닫혀 있고 환기구도 닫혀 있는 경우에는 문과 창문 등의 틈새로 가스가 새겨된다. 심지어 파이프나 전선(wire)들에 의해 만들어진 틈이나 벽의 갈라진 틈으로도 연소가스는 배출된다. 이러한 것들이 벤트로 작용하는 것이다.

건물내 화재시 발생되는 연소가스는 두 가지 과정을 거쳐 벤트를 통해 밖으로 방출된다. 먼저 화재에 의한 열로 인하여 방안의 공기가 가열되고 팽창하여 모든 가능한 벤트를 통해 가스를 밖으로 밀어내고 동시에 가열된 가스는 열기류의 형태(thermal plume)로 천장까지 상승하여 밖으로 방출된다. 그러므로 가스에 작용하는 힘은 압

력과 중력에 의한 것이라고 할 수 있는데 중력에 의한 가스의 유동을 부력유동(buoyant flow)이라 한다.

방화공학에서 가스의 방출량 및 외부공기의 유입량 등의 유동계산은 일반적으로 베르누이(Bernoulli) 방정식을 이용하여 수행되고 있다⁽³⁾.

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{유선을 따라 일정} \quad (1)$$

그러나 위 식에 의한 해는 난류, 점성, 유동박리, 열전달의 영향 등을 무시한 근사해이므로 유동계수(flow coefficient), 마찰계수(friction factor) 또는 손실계수(loss coefficient) 등을 이용하여 정확히 보정하여야 한다. 일반적으로 이러한 보정요소들은 유동의 Reynolds수 ($Re = VD/\nu$), Froude수 ($Fr = V^2 \Delta\rho / \rho g D$), Prandtl수 ($Pr = C_p \mu / k$)와 같은 무차원수 등에 대하여 실험적으로 구해져야만 하는 값들이다.

2.1 가스팽창의 영향

화재발생의 초기에 건물내장재, 가구 등의 연소는 독성 연소가스를 생성하게 되는데 이 연소가스의 생성이 밀폐된 방안의 압력을 높이고 밀폐가 되지 않았다면 벤트(vent)를 통해 가스를 밖으로 밀어낸다. 밀폐된 방안의 압력은 다음 식으로 표현될 수 있다⁽⁴⁾.

$$p = \frac{M_o RT}{V_o} \quad (2)$$

초기에 실내는 체적 V_o 의 방, 공기 M_o , 온도 $T_o = 300$ K, 압력은 $P_o = 1$ atm이라고 할 때, 고체연료-건물내장재, 가구 등-의 질량 M_b 이 타서 연소가스가 방안에 가득 차고 가스의 온도는 방출된 화학에너지에 의해 상승하게 된다.

$$(M_o + M_b)u_1 = M_o u_o + M_b u_{o'} \quad (3)$$

위식에서 좌변은 최종내부에너지를 우변은 초기내부에너지를 나타낸다. 여기서 $u_1 = c_p T_1$, $u_o = c_p T_o$, $u_{o'} =$ 초기내부에너지/고체연료의 단위질량이다. $u = h - RT$ 이고 정압반응열 $- \Delta h = q$ 이므로

$$(M_o + M_p)c_p T_1 = M_o c_p T_o + M_p q + M_p c_p T_o \quad (4)$$

위 식을 풀면 최종가스온도는 다음과 같다.

$$T_1 = T_o \frac{1 + \gamma \frac{M_o}{M_o} + \gamma \frac{M_p}{M_o} Da_2}{1 + \frac{M_p}{M_o}} \quad (5)$$

여기서 $\gamma = c_p/c_v$, $Da_2 = \frac{q}{c_p T_o}$ 이차 Damkoler 수이다. 따라서 이때 압력은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{p_1}{p_o} = \frac{(M_o + M_p) T_1}{M_o T_o} = 1 + (1 + Da_2) \gamma \frac{M_p}{M_o} \quad (6)$$

예를 들면 완전히 밀폐된 크기 $3 \times 3 \times 3 = 27m^3$ 의 실내에서 $1ft^3$ 의 폴리우레탄 의자쿠션이 탈 때 쿠션의 무게를 $M_p = 1.33kg$, 반응열을 $2.3 \times 10^7 J/kg$ 이라 하고 방안의 공기무게를 $M_o = 31.75kg$, 폴리우레탄의 비열 = $1,900 J/kg^\circ F$, $Da_2 = 53.7$, $\gamma = c_p/c_v = 1.4$ 이라고 하면 이때의 압력상승은 다음과 같다.

$$\frac{p_1}{p_o} = 4.21 \quad (7)$$

그러므로 연소가스가 새나갈 수 있는 벤트가 없다면 한 개의 의자쿠션의 연소에 의해서도 실내의 압력은 4기압 이상으로 상승하여 $9m^2$ 의 한쪽 벽면에 대해 $2,926,557N(298.6tons)$ 의 힘을 가하게 된다. 그러므로 밀폐된 방안의 매우 작은 화재도 건물의 강화 콘크리트 벽을 쉽게 밀어낼 수 있는 것이다.

2.2 벤트를 통한 비부력유동(Non-Buoyant Flows)

일반적으로 건물화재는 위 절에서 언급한 바와 같이 화재가 발생한 실내의 압력을 그리 크게 높이지는 못한다. 대개는 실내의 틈으로 새고 창문이나 문 등이 밀어 열리거나 깨지기 때문이다. 그림 1에서와 같이 밀도 ρ 의 유체가 면적 A의 벤트(vent)를 가로질러 압력차 $\Delta p = p_1 - p_2$ 가

존재한다면 유동이 발생하며 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\text{속도} \quad V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

$$\text{유량} \quad Q = C_D A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (9)$$

$$\text{질량유량} \quad m = C_D A \sqrt{2\rho \Delta p} \quad (10)$$

여기서 사용된 단위는 $\Delta p = [N/m^2]$, $A = [m^2]$, $\rho = [kg/m^3]$ 이며 C_D 는 유동계수이다.

압력차가 적다면 벤트를 통한 유동시, 공기나 연소가스의 밀도는 크게 바뀌지 않지만 압력차가 크다면 속도와 유량을 계산하는 위식은 더욱 복잡하게 되며, 벤트 상류의 압력과 밀도가 p_1, ρ_1 이고 벤트 후류에서 압력이 p_2 일 때 속도와 유량은 다음과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{2p_1}{\rho_1} \left\{ \frac{\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\gamma} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2}} \quad (11)$$

$$m = C_D A \sqrt{2\rho_1 p_1} \left\{ \frac{\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/\gamma} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (12)$$

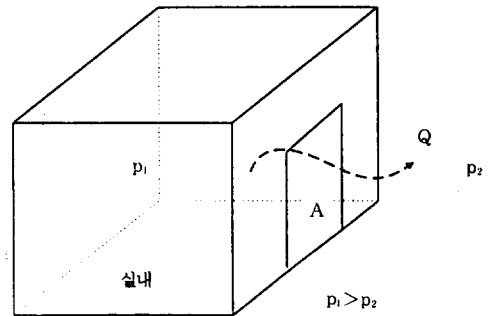


그림 1 압력차가 존재할 때 벤트를 통한 유동

연소가스는 항상 많은 양의 공기를 포함하고 있기 때문에 γ 의 값은 1.33-1.40정도이다. 따라서 일반적인 화재 방재대책에 관한 연구에서 공기의 비열비 1.40을 위식에 사용하는 것은 충분한 정확도를 갖는다.

위식에서 질량유량은 다음의 압력비를 가질 때 최대가 된다.

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma / (\gamma - 1)} \quad (13)$$

$\gamma = 1.4$ 이면 후류 압력이 $p_2 = 0.528p_1$ 일 때 최대 유량에 도달하며, 이 압력이하로 후류의 압력을 낮추어도 유량 m 은 일정하게 유지된다.

$$m = C_D A \sqrt{\rho_1 p_1} \left[\gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma + 1) / (\gamma - 1)} \right]^{1/2} \quad (14)$$

(8)-(14)식을 이용하고 적절한 유동계수 C_D 의 값이 주어지면 벤트를 통한 가스의 유량을 산정할 수 있다. 이때 유동계수는 실험적으로 구해져야 하는 값으로 유체의 점성, 속도분포의 균일성, 난류 등의 영향을 고려하여 보정하게 된다. 실제로 유동계수는 Reynolds수에 가장 크게 의존하는 것으로 알려져 있다. Reynolds수의 정의는 다음과 같다.

$$Re = \frac{V D \rho}{\mu} \quad (15)$$

여기서 D 는 수력직경(hydraulic diameter)으로 건물화재시 벤트로 작용하는 문이나 창문은 대개 사각이므로 다음과 같이 정의된다.

$$D = \frac{4A}{P} \quad (16)$$

여기서 A 는 벤트의 단면적, P 는 외주(perimeter)를 나타낸다. 높이 a , 폭 b 인 사각 벤트에 대해 $A = ab$, $P = 2(a + b)$ 이므로 $D = 2ab / (a + b)$ 이다.

노즐과 오리피스(orifice)에 대한 유동계수를 그림 2에 나타내었다. 실제 건물화재시 유동의 Reynolds수는 10^6 정도인데 이때 노즐의 유동계수는 대략 0.98이고 오리피스(orifice)의 유동계수는 0.6정도임을 알 수 있다. 이는 실제 유량이

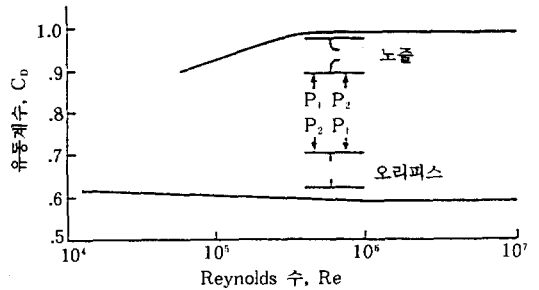


그림 2 노즐 및 오리피스의 유동계수

이론적인 유량보다 감소함을 의미하는 것으로 오리피스(orifice)의 경우에 가장자리에서 유동박리를 일으켜 실제 유동이 지나가는 유로가 좁아지기 때문이다(Vena Contracta).

2.3 수직 벤트를 통한 부력유동(Buoyant Flows)

화재가 성장함에 따라 실외로 배출되는 부력유동(buoyant flow)에 의한 유량은 화재발생 초기의 가스팽창에 의한 효과를 넘어서게 된다. 따라서 화재가 난 실내의 압력은 대기압보다 낮아지게 되고 외부의 공기가 실내의 바닥 쪽으로 유입된다. 흔히 볼 수 있듯이 연소가스와 화염은 창문의 윗부분으로 배출되고 외부공기가 창문의 아랫면으로 유입되는 것으로 이러한 부력유동의 운동역학이 계속적으로 신선한 산소를 실내로 공급하여 화재를 성장하게 한다^{(4), (5)}.

부력에 의한 유동(Buoyancy-driven flow)을 구하기 위해서는 먼저 벤트(vent)를 가로지르는 압력차를 알아야 한다. 그림 3은 이러한 압력차를 나타낸 것으로, 바닥에서의 압력차는

$$\Delta p_s = p_s - p_o \quad (17)$$

여기서 p_s 는 벤트 안쪽 바닥에서의 압력이고 p_o 는 벤트 바깥쪽 바닥에서의 압력을 나타낸다. 높이 y 에서 압력은 바닥에서의 압력보다 낮고 다음과 같은 정수압 방정식으로 나타내어진다.

$$p_1 = p_s - \int_0^y \rho_1 g dy \quad (18)$$

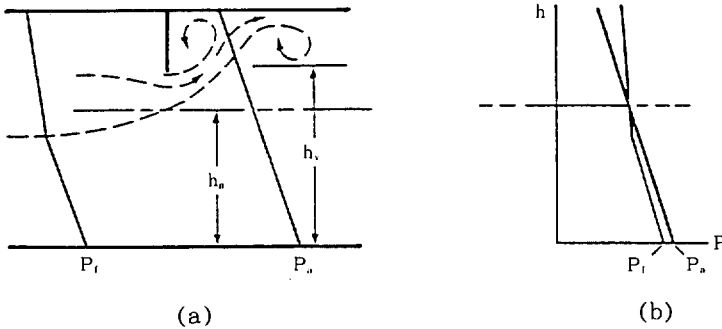


그림 3 수직 벤트의 안쪽과 바깥쪽에서의 압력 분포

$$p_2 = p_a - \int_0^y \rho_2 g dy \quad (19)$$

높이 h에서 압력차는

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \Delta p_s + \int_0^h (\rho_2 - \rho_1) g dy \quad (20)$$

윗식에서 벤트 바깥쪽 공기의 밀도 ρ_2 는 실내 연소가스의 밀도 ρ_1 보다 크므로 적분값은 양이고 Δp 의 부호에 따라 벤트의 위에서는 유출유동(outflow), 벤트의 아래에서는 유입유동(inflow)이 발생한다. 높이 h에서의 유량과 속도는 기본적으로 식(8)-(10)과 같지만 높이에 따라 밀도가 다르므로 단위면적당으로 주어진다.

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

$$\frac{Q}{A} = C_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (22)$$

$$\frac{m}{A} = C_d \sqrt{2\rho \Delta p} \quad (23)$$

위식을 사용하기 위해서는 ρ 와 Δp 의 값이 주어져야 하는데, 먼저 연소가스의 밀도 ρ 는 이상기체 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{Mp}{RT} \quad (24)$$

여기서 M =평균 분자량(mean molecular weight), $R=8,314 J/(kg \text{ mole } K)$ 이상기체상

수이다. 밀도는 압력과 온도에 의해 결정됨을 알 수 있다. 밀도에 대한 압력의 영향을 살펴보기 위하여 바닥으로부터 100m 높이의 고층건물 옥상까지의 대기의 압력변화를 고려하면

$$p_o - p_i = \rho gh = 1,154 \text{ pa} \quad (25)$$

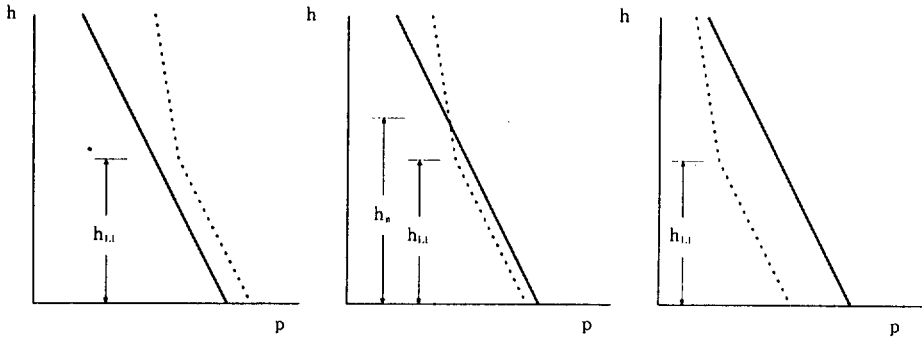
이것은 대기압의 1.12%에 해당하며, 화재에 의한 압력변화가 연소가스의 밀도에 거의 영향을 미치지 못함을 나타내고 있다. 또한 연소가스는 다량의 공기를 함유하고 있어 공기의 분자량(molecular weight)을 사용하여도 거의 차이가 없다. 그러므로 밀도는 주로 연소가스의 온도에 의해서 결정된다고 할 수 있다(실제 화재시 밀도는 온도변화에 따라 4배까지 변한다).

$$\rho = \frac{352.8}{T} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (26)$$

수직 벽면을 통한 사각형 벤트(창문, 문)의 경우를 생각해 보면 이때 실내는 성층화되어 있고 실외는 밀도가 일정하다고 가정할 수 있다. 벤트를 가로지르는 압력차는 그림 4에서와 같이 압력 분포에 따라 다음의 3가지 형태를 보인다.

(a)경우는 화재발생 초기에 해당하는 것으로 가스의 팽창에 의해 연소가스가 벤트(vent)의 전단면을 통해 외부로 배출된다($\Delta p > 0$).

(b)경우는 건물화재시 주로 목격되는 유동형태로서 부력에 의해 연소가스는 벤트의 위쪽으로 배출되고 아래쪽으로 외부의 공기가 유입된다



(a) 유출유동 (b) 상부는 유출유동, 하부는 유입유동 (c) 유입유동

그림 4 수직 벤트의 _____ 바깥쪽과 안쪽에서의 압력분포

($\Delta p_s < 0$).

(c)경우는 화재의 말기에 해당하며 외부의 공기가 실내로 유입된다.

(a)와 (c)의 경우에는 일방향유동(unidirectional flow)이므로 적분은 vent의 바닥면에서 윗면까지 수행하여 유동을 계산하게 된다. 일반적인 건물화재시 압력분포인 (b)의 경우에는 압력차가 0인 높이가 존재하는데 이 높이를 중립축(neutral axis, h_n)라 한다. 따라서 중립축으로부터 벤트의 윗면까지 식(21)-(23)를 적분하여 가스의 유출량을 계산할 수 있다. 먼저 압력차와 밀도에 대한 식(20)과 식(26)을 이용하고 $\Delta p_{sm} = 0$ 이므로 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$v = 4.43 \left| T_v \int_{h_n}^h \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) dh \right|^{1/2} \quad [m/s] \quad (27)$$

$$Q = 3.01 \int_{h_n}^h b \left| T_v \int_{h_n}^h \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) dh \right|^{1/2} dh \quad [m^3/s] \quad (28)$$

$$m = 1,063 \int_{h_n}^h b \left| \frac{1}{T_v} \int_{h_n}^h \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) dh \right|^{1/2} dh \quad [kg/s] \quad (29)$$

여기서 유동계수 $C_D = 0.68$ 이 사용되었고 T_v 는 벤트 단면에서의 온도분포, b 는 벤트의 폭이다.

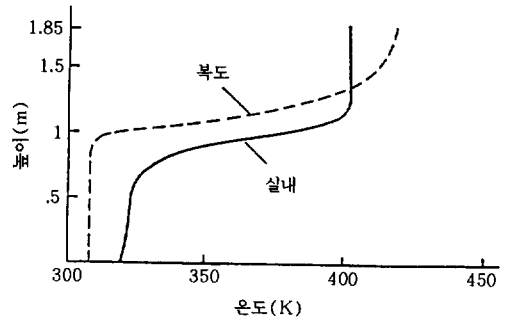


그림 5 벤트 안팎에서의 전형적인 온도분포

외부공기의 유입량은 적분을 h_n 에서 h_o (벤트의 바닥면)까지 수행함으로써 구할 수 있다. 그러므로 다음의 4가지 정보가 구해지면 식(27)-(29)을 사용하여 벤트를 가로지르는 연소가스의 유출량과 공기의 유입량을 구할 수 있다⁽⁶⁾.

1. h_n - 중립축 위치
2. T_1 - 벤트의 실내측 온도분포
3. T_2 - 벤트의 실외측 온도분포
4. T_v - 벤트 단면에서의 온도분포

그러므로 벤트 안팎의 온도분포와 벤트 단면상의 연소가스층의 높이(중립축)를 측정하여 연소가스의 유출량과 공기의 유입량을 산출할 수 있게 된다. 그림 5는 실제 건물화재시 실내와 복도에서의 전형적인 온도분포를 나타내고 있다.

2.4 수평 벤트를 통한 부력유동(Buoyant Flows)

2.4.1 표준 벤트유동모델(Standard Vent-Flow Model)

수평 벤트(vent)를 통한 유동은 위에서 언급한 바와 마찬가지로 베르누이(Bernoulli) 방정식과 적절한 유동계수를 사용하여 구해질 수 있다⁽⁷⁾. 그림 6과 같이 아래층에 화재가 발생한 방이 있고 위층과의 사이에 벤트가 있는 경우를 고려하면 아래층에서는 화재에 의한 온도상승으로 인하여 $\rho_{top} > \rho_{bot}$ 가 된다. 표준 벤트유동모델을 사용하면 $\Delta p (= p_{bot} - p_{top})$ 조건에 따라 수평 벤트를 통한 유동은 다음과 같이 표현되며, 이 때의 유동형태를 그림 7에 나타내었다.

$$Q_{bot, s} = C_D A_v \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{bot}}}, \quad Q_{top, s} = 0$$

if $\Delta p > 0$ (30)

$$Q_{bot, s} = 0, \quad Q_{top, s} = 0$$

if $\Delta p = 0$ (31)

$$Q_{bot, s} = 0, \quad Q_{top, s} = C_D A_v \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{top}}}$$

if $\Delta p < 0$ (32)

위식으로부터, 표준 벤트유동모델을 사용하면 언

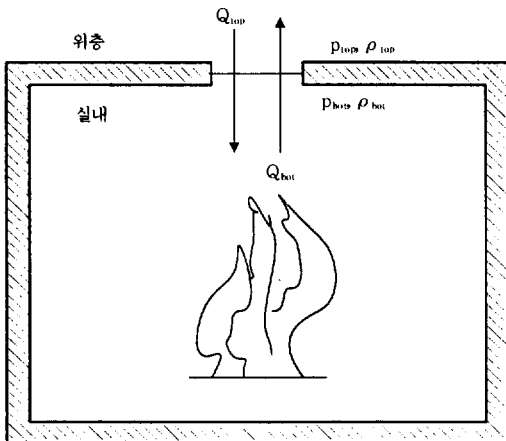


그림 6 수평 벤트에서의 유동

제나 Δp 의 부호에 따라 일방향유동(unidirectional flow)만이 산출됨을 알 수 있다. 그러나 $\Delta p \approx 0$ 인 경우에 유동이 없다는 결론은 명확히 잘못된 것임을 알 수 있다. 위쪽에 무거운 가스가 차 있어서 불안정한 유동장(unstable hydrostatic equilibrium)이 형성되고 미세한 유동교환에도 유동이 발생하기 때문이다. 따라서 이러한 $\Delta p \approx 0$ 의 조건하에서는 일방향유동(unidirectional flow) 대신에 이방향교환유동(two-directional exchange flow)이 형성되게 되며 표준 벤트유동모델로 해석할 수 없는 경우가 되므로 이를 보완한 모델이 필요하게 된다.

2.4.2 교환 유동 모델(Exchange Flow Model)

표준 벤트유동모델이 적절하지 않은 $\Delta p \approx 0$ 경우에 벤트유동을 보완하기 위하여 Q_{top} , Q_{bot} 를 식(30)-(32)의 유동성분과 교환 유동 성분(exchange-flow component) Q_{ex} 의 합으로 나타낸다.

$$Q_{top} = Q_{top, s} + Q_{ex} \quad (33)$$

$$Q_{bot} = Q_{bot, s} + Q_{ex} \quad (34)$$

밀도분포가 불안정하지 않은 경우에는 표준 벤트유동모델은 유용하다.

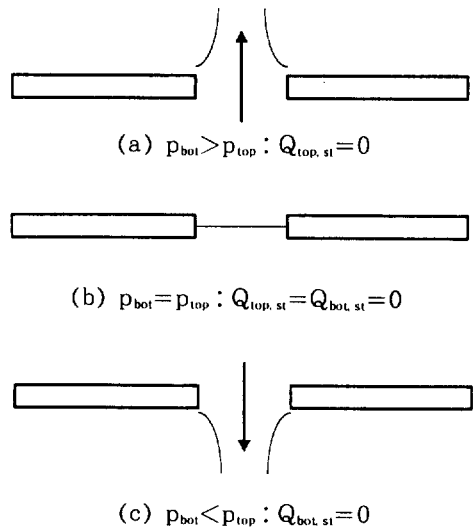


그림 7 수평 벤트를 통한 표준 벤트유동모델

$$Q_{ex} = 0 \quad \text{if } \rho_{top} \leq \rho_{bot} \quad (35)$$

그러나 $\rho_{top} > \rho_{bot}$ 의 조건하에서는 원형 및 사각형 벤트에 대해서 다음과 같은 교환유동이 발생하게 된다⁽⁸⁾.

$$Q_{ex} = 0.055 \sqrt{\frac{g \Delta \rho D^3}{\rho}} \quad \text{if } \rho_{top} > \rho_{bot} \quad (36)$$

여기서 D는 벤트의 지름, g는 중력가속도이고 $\bar{\rho} = \frac{\rho_{top} + \rho_{bot}}{2}$ 이다. 벤트의 단면적 $A_v = \pi D^2/4$ 이므로

$$Q_{ex} = 0.10 \sqrt{\frac{g \Delta \rho A_v^{5/2}}{\bar{\rho}}} \quad \text{if } \rho_{top} > \rho_{bot} \quad (37)$$

벤트 상하면의 압력차 $|\Delta p|$ 가 0으로부터 서서히 증가하면 어느 한도까지는 교환유동성분, Q_{ex} 이 존재한다. 그러나 $|\Delta p|$ 가 어떤 임계값(critical value, $|\Delta p_{\text{good}}|$)을 넘어서면 교환유동성분 Q_{ex} 는 0이 된다.

$$Q_{ex} = 0 \quad \text{if } \rho_{top} > \rho_{bot} \quad \text{이고} \quad |\Delta p| > |\Delta p_{\text{good}}| \quad (38)$$

그러므로 벤트를 지나는 유동은 다시 표준 벤트 유동모델로 예측이 가능한 일방향유동이 되며 (Purging), 이러한 유동형태의 변화를 그림 8에 보이고 있다. 여기서 Q_{ex} 와 Δp 의 함수관계는 선

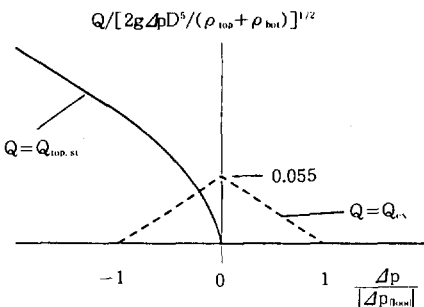


그림 8 교환유동모델에서의 교환유동성분

형의존한다고 가정하고 있다.

교환유동성분 Q_{ex} 를 구하기 위해서는 먼저 일방향유동(purging)이 일어나는 임계 압력차 $|\Delta p_{\text{good}}|$ 를 알아야 하는데, Cooper⁽⁷⁾은 다음과 같은 식을 제안하고 있다.

$$|\Delta p_{\text{good}}| = C_{\text{shape}}^2 \frac{g \Delta \rho D^3}{2 A_v^2} \quad (39)$$

여기서 C_{shape} 은 원형 벤트에 대해서는 0.754, 사각 벤트에 대해서는 0.942이다. 구해진 $|\Delta p_{\text{good}}|$ 를 가지고 선형적인 교환유동성분 Q_{ex} 를 다음 식으로 구하고, 식(33), (34)를 이용하여 수평 벤트를 통한 유량을 계산할 수 있다.

$$Q_{ex} = Q_{ex, \text{max}} \left(1 - \frac{|\Delta p|}{|\Delta p_{\text{good}}|} \right) \quad \text{if } \Delta \rho > 0, |\Delta p|/|\Delta p_{\text{good}}| < 1 \quad (40)$$

$$Q_{ex} = 0 \quad \text{otherwise}$$

실제 건물에는 여러 가지 형태의 수평 및 수직 벤트가 존재하므로 위에서 언급한 가스유동에 관한 계산식들을 국부적으로 적용한 후 통합하는 방법으로 연소가스의 확산예측이 이루어지게 된다.

3. 맺음말

건물화재시 화염의 성장과 독성 연소가스의 확산을 예측하기 위하여 화재에 의한 연소가스의 벤트(vent)유동에 관한 내용을 살펴보았다. 대개의 건물화재는 초기의 발화 후 가스의 팽창에 의한 압력상승으로 유동이 발생하고 지속적인 화염의 성장과 함께 고온의 연소가스가 여러 가지 형태의 벤트를 통해 건물의 상부로 이동하는 부력 유동으로 볼 수 있다. 이러한 복잡한 유동의 특성으로 인하여 연소가스의 건물내 확산을 예측하기는 매우 어려워 독성연소가스에 의한 인적피해를 줄이기 위한 방재시스템의 효율성과 신뢰도를 격감시키고 있다. 따라서 벤트를 가로지르는 압력차 및 온도분포에 따른 유동특성을 파악하고 외부공기의 유입량 및 가스의 확산경로를 예측함

으로써 건물화재시 피해를 최소화할 수 있는 방재시스템의 개발이 가능하다.

참 고 문 헌

1. Arthur Cote, P. E. and Percy Bughee, 1988, Principles of Fire Protection, National Fire Protection Association.
2. 三好敏章, 1997, 방재시스템, 설비기술 97. 3 월호, pp. 70-81.
3. P. J. DiNenno ed., 1988, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association.
4. H. W. Emmons, 1987, The Flow of Gases Through Vents, Home Fire Project Technical Report No. 75, Harvard University.
5. G. Heskestad and R. D. Spaulding, 1989, Inflow of air required at wall and ceiling apertures to prevent escape of fire smoke, Factory Mutual Research Technical Report, MA.
6. L. Y. 1989, Cooper, A note on calculating flows through vertical vents in zone fire models under conditions of arbitrary cross-vent pressure difference, Comb. Sci. & Tech., Vol. 64, pp. 43-50.
7. L. Y. Cooper, 1989, Calculation of the flow through a horizontal ceiling/floor vent, NIST Tech. Report, No, NISTIR-89-4052.
8. M. Epstein, 1988, Buoyancy-driven exchange flow through small openings in horizontal partitions, J. Heat Transfer, 110, pp. 885-893.