

煙氣의 制御(I)

金 會 千*

건물화재시 연기는 화재원으로부터 떨어진 장소로 이동하게 되어 생명과 재산에 피해를 주게 된다. 계단이나 엘리베이터는 종종 연기로 충만하게 되어 피난을 방해하게 된다. 연기는 우리가 잘 알다시피 화재시 사망에 이르는 가장 큰 원인이다.

1960년대 후반 계단으로의 연기누출을 방지하기 위하여 가압유지법이 주목을 끌게 되었다. 이러한 개념은 화재층을 환기내지는 배기 그리고 주변층을 가압유지시키는 개념으로 발달하였다. 건물의 환기시스템은 자주 이러한 목적을 위해 사용되어진다. 煙制御란 화재시 연기의 유동을 제한하기 위해 팬에 의해 제어되는 압력을 이용하는 시스템이다.

본고에서는 HVAC에 관계하는 건물에서의 방화와 연계어 시스템에 대해 논하기로 한다. NFPA(1988)에서는 연기를 열분해나 폭발할 때 방출되는 공기를 통해 이동하는 매질과 수용성물질 그리고 개스로 구성된다고 설명하고 있다.

화재안전(Fire Safety)의 목적은 건물내의 재산, 기물, 재산과 인접건물을 화재로부터 보호하는 것이다. 여러 형태의 시스템 분석은 안전에 대한 것을 정량적으로 평가하는데 도움이 된다. 인간에 대한 안전은 재실자에 따라 달라지게 되는데, 요양원에서 요구되는 사항은 사무소 건물의 것과는 다르다.

화재안전에 대한 두가지의 기본적 접근은 점화를 방해하고 화재영향을 조절하는 것이다. 그림-1은 화재안전을 위한 의사결정방식을 나타낸 것이

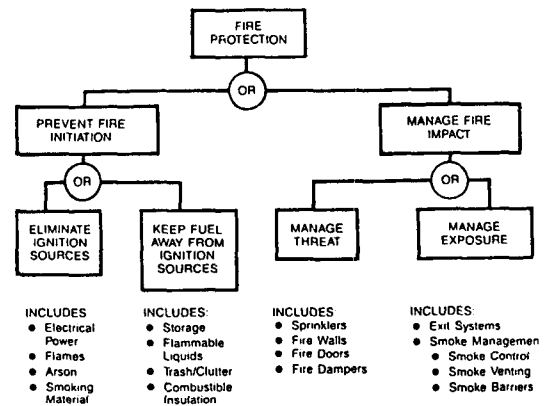


그림-1. 간략화된 방화 결정 트리

다. 화재발화를 예방할 수 있는 자는 먼저 재실자와 관리자이다. 건물 디자인 입안자(Building Design Team)는 재실자와 관리자가 이러한 노력을 할 수 있도록 빌딩형상을 구체화시켜야 한다. 화재를 완전히 차단하는 것은 불가능하기 때문에 화재영향을 조절하는 것이 화재안전계획상 중요한 요소가 된다. 구획분할, 진화, 구조체 재질의 조절, 출구시스템, 연기조절 등이 그 예이다. NFPA Fire Protection Handbook(1986)은 화재안전에 대해 자세히 서술하고 있다.

역사적으로 방화전문가들은 HVAC시스템을 연기나 화재를 쉽게 전파시킬 수 있고 침투되기 용이한 위험성을 다분히 갖고 있는 부재(벽, 바닥 등)로 간주하였다. 이러한 이유로 화재발생시 시스템은 습관적으로 폐쇄되었다. 시스템이 단려져 연기를 강제로 내보내는 것을 방지할 수 있을 지라도 연부력, 굴뚝효과, 또는 바람에 의해 덕트

* 正會員, 漢陽大學校 大學院

를 통한 연기의 유동을 방지하지는 못한다. 연기에 대한 문제를 해결하기 위해 연제어의 개념이 발달하였으며, 이러한 것은 전체 건물 방재시스템의 한 부분에 불과한 것이다.

1. 煙流動(SMOKE MOVEMENT)

연제어 시스템은 굴뚝효과, 부력, 팽창, 바람 그리고 HVAC시스템을 포함하는 연유동을 야기하는 힘에 의해 과부하가 걸리지 않도록 디자인 되어야한다. 화재시 연기는 보통 이러한 요소들의 복합작용에 의해 움직이게 된다.

1) 굴뚝효과(Stack Effect)

외부공기가 차가울 때 공기는 계단실, 엘리베이터 샤프트, 덤웨이터 샤프트, 기계설비 샤프트 또는 메일 샤프트와 같은 건물 샤프트내에서 상승하게 된다. 순굴뚝효과(Normal Stack Effect)는 건물내 공기가 외기온보다 높고 밀도가 희박할 때 발생한다. 순굴뚝효과는 외기온이 낮을 때 특히 고층건물에서 크게 되지만, 이런 현상은 단층건물에서도 발생할 수 있다.

외기온이 건물내 온도보다도 높을 때에 샤프트내에 하강기류나 역굴뚝효과(Reverse Stack Effect)가 자주 발생한다. 표준대기압 하에서 순 또는 역굴뚝효과에 따라 생기는 압력차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta p = 3,460(1/T_o - 1/T_i)h \quad (1)$$

여기서, Δp =압력차, P_a
 T_o =외기절대온도, K
 T_i =샤프트내 공기의 절대온도, K
 h =중성대 상단거리, m

중성대가 중간에 있고 외기온도 -18°C , 내부온도 21°C , 건물높이 60m인 건물에서 굴뚝효과에 의한 최대압력차는 $55P_a$ 이 될 것인데, 이것은 건물상부에서 샤프트 압력이 외부압력보다 $55P_a$ 이 크다는 것을 의미한다. 샤프트의 하부에서는 $55P_a$ 낮게된다. 그림-2는 건물샤프트와 외부의 압력차를 나타낸 것으로, 정압은 샤프트 압력이

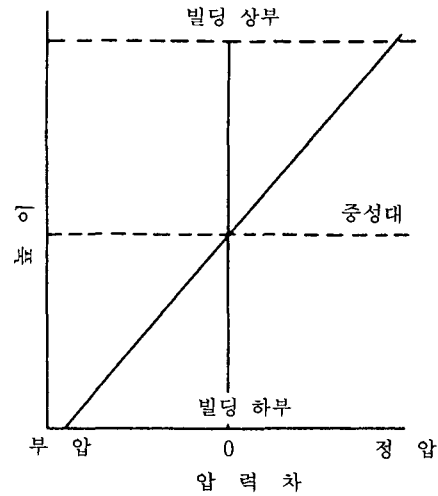
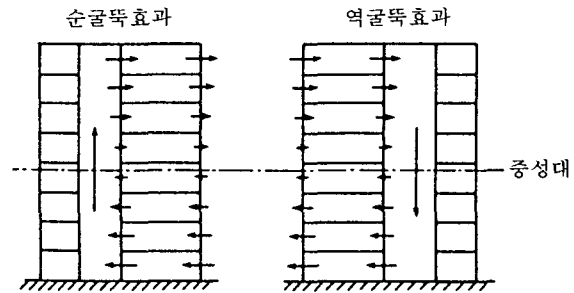


그림-2. 순굴뚝효과에 의한 건물샤프트와 외부의 압력차



주: 화살표는 공기의 흐름방향을 표시
 그림-3. 순굴뚝효과와 역굴뚝효과에 의한 공기의 이동

외부압력보다 높음을, 부압은 그 반대를 의미한다.

굴뚝효과는 항상 건물과 외부사이에 항상 존재하고 있다. 그림-3은 순굴뚝효과와 역굴뚝효과에 의해서 생기게 되는 연유동을 나타낸 것이다. 이 경우 건물외부와 샤프트간의 압력차는 식(1)과 같이 표현된다.

그림-4는 굴뚝효과에 의해 발생하는 압력차를 구할 수 있는 도표이다. 순굴뚝효과에서 $\Delta p/h$ 는 (+)값이고, 중성대 상단의 압력차는 정압 그리고 하단의 압력차는 부압이다. 역굴뚝효과에서 $\Delta p/h$ 는 (-)값이고, 중성대 상단의 압력차는 부압 그리고 하단의 압력차는 정압이다.

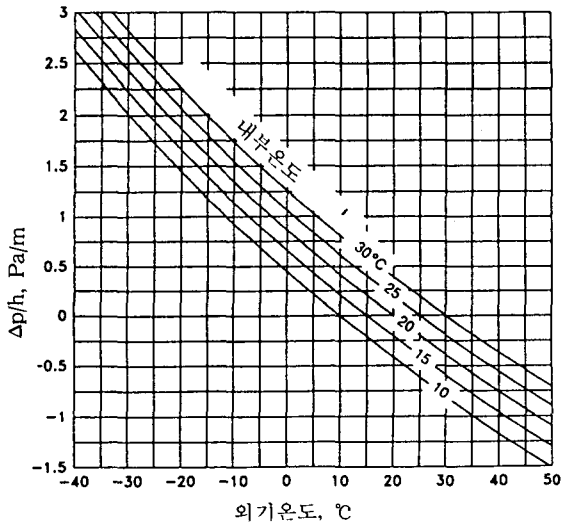


그림-4. 굴뚝효과에 의한 압력차

외부계단을 갖는 매우 기밀한 구조의 건물에서는 역굴뚝효과가 외기온이 낮더라도 일어날 수 있다(Klote). 이러한 경우 외부계단실의 온도는 건물온도보다 상당히 낮게 된다. 계단실은 차가운 공기의 기둥을 형성하고, 건물내 다른 샤프트들은 따뜻한 공기의 기둥을 형성한다.

누설경로가 높이에 따라 일정하다면, 중성대는 건물의 중간지점 근처에 위치하게 된다. 그러나 누설경로가 일정하지 않으면 중성대의 위치는 환기샤프트의 경우와 같이 상당히 변할 수 있다. McGuire와 Tamura는 통풍조건에 따른 중성대의 위치를 계산하는 방법을 제시하였다.

건물화재시 연유동은 굴뚝효과에 따라 변할 수 있다. 순굴뚝효과가 일어나는 건물에서는 현존 기류에 의해 연기는 출화지점으로 부터 상당히 떨어진 거리로 이동할 수 있다(그림-3). 화재가 중성대 하단에서 출화하면 연기는 건물내의 공기와 더불어 샤프트 위쪽과 안쪽으로 움직인다. 이러한 상승연기류는 연기온도에 따른 부력에 의하여 증가하게 된다. 중성대 상단이면 연기는 샤프트에서 건물 상부층으로 이동한다. 층간누설을 무시하면, 화재층을 제외한 중성대 하단의 층들은, 생성된 연기량이 굴뚝효과로 생기는 기류에 의해 처리할 수 있는 양보다 많을 때까지는 상대적으로 연기에 영향을 받지 않는다.

중성대 상단에서 발생한 화재로부터 생기는

연기를 건물내 기류에 의하여 건물의 외부 개구부를 통하여 외부로 이동하게 된다. 층간 누설을 무시하면 화재층을 제외한 모든 층은 생성된 연기량을 굴뚝효과로 생기는 기류에 의해 처리할 수 있는 양보다 많을 때까지는 상대적으로 연기에 영향을 받지 않는다.

역굴뚝효과(그림-3)에 의해 생기는 공기흐름은 상대적으로 차가운 연기를 아래로 움직이려 할 것이다. 연기의 온도가 높은 경우에는, 역굴뚝효과가 일어나는 조건에서도 부력으로 인해 연기의 흐름이 위쪽으로 될 수 있다.

2) 부력(Buoyance)

화재시 발생하는 고온의 연기는 밀도의 감소로 인해 부력을 갖게 된다. 화재구획부와 그 주변의 압력차는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta p = 3,460(1/T_o - 1/T_f)h \quad (2)$$

여기서, Δp = 압력차, Pa

T_o = 주위의 절대온도, K

T_f = 화재구획부의 절대온도, K

h = 중성대 상단거리, m

부력에 의해 생기는 압력차는 그림-5(주위온도 20°C에 대한 것)에서 구할 수 있다. 중성대라는 것은 화재구획부와 주위부간의 압력이 균일한 것을 말한다. 화재구획부의 온도가 800°C인 화재에 있어서 중성대 상부 1.5m지점의 압력차는 13Pa이다. Fang은 일련의 실험크기 시험을 거쳐 실화재에 의한 압력을 연구하였는 바, 이 시험을 행하는 도중 도달된 최대압력차는 천장 화재실벽 사이에서 16Pa이었다.

보다 큰 압력차는 중성대로 부터의 거리 h 가 더욱 크게되는 고층화재구획부에서 가능할 것이다. 화재구획부의 온도가 700°C이면 중성대 상부 10.7m지점에서의 압력차는 90Pa이다. 이러한 것은 대화재를 야기시키며, 이로 인해 발생하는 압력은 현존하는 연제어법으로는 제어할 수 없다. 그러나 Example은 식(2)가 적용될 수 있는 범위를 보여 준다.

화재실의 천장에 누설경로를 갖는 건물에서

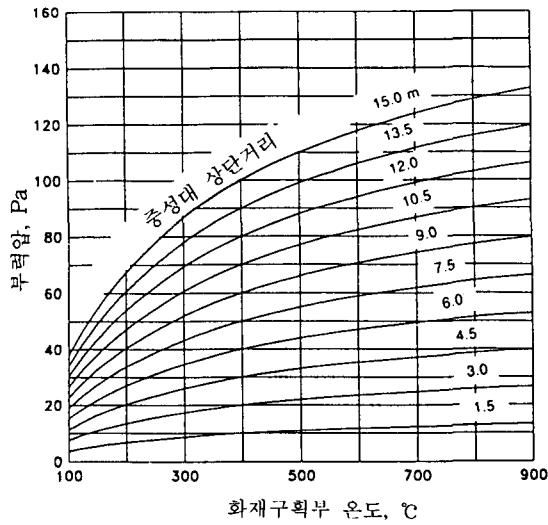


그림-5. 부력에 의한 압력차

이러한 부력유발압력은 연기를 화재실 상부층으로 이동하게 한다. 아울러 이러한 압력은 벽이나 화재구획부의 개구부에 있는 누설경로를 통하여 연기를 움직이게 한다. 연기가 화원으로 부터 분출할 때 그 온도는 열전달과 희석에 의해 낮아지게 된다. 그러므로, 부력효과는 화염으로부터 멀수록 떨어지게 된다.

3) 팽창(Expansion)

부력과 더불어 발생하는 에너지는 팽창으로 연기를 움직이게 한다. 단지 1개의 개구부를 갖는 건물의 화재구획부에서, 건물내 기류는 안으로 유동할 것이며 고온의 연기는 밖으로 이동할 것이다. 연료의 부가된 양이 기류와 비교하여 적으므로 무시하면 용적흐름비는 절대온도비로서 나타낼 수 있다.

$$Q_{out}/Q_{in} = T_{out}/T_{in}$$

여기서, Q_{out} = 화재구획부에서 분출하는 연기의 용적흐름비, m^3/s

Q_{in} = 화재구획부로 유입하는 공기의 용적흐름비, m^3/s

T_{out} = 화재구획부에서 분출하는 연기의 절대온도, K

T_{in} = 화재구획부로 유입하는 공기의 절대온도, K

연기온도 700°C일 때 용적흐름비는 3.32가 될 것이다. 계산에는 절대온도가 이용된다. 이러한 경우 화재구획부로 유입하는 공기량이 1.5 m^3/s 이면, 화재구획부에서 분출하는 연기량은 5.0 m^3/s 가 될 것이다. 이 경우 가스는 처음의 분량보다 3배정도 늘어나게 된다.

개구부나 창문을 갖는 화재구획부에서 팽창에 의해 생기는 이러한 개구부간의 압력차는 무시된다. 반면 기밀한 화재구획부에서는 팽창에 의해 생기는 압력차는 중요하게 된다.

4) 바람

여러 경우 바람은 건물내 연기의 유동에 영향을 미칠 수 있다. 표면에 미치는 바람의 압력 P_w 는 다음과 같다.

$$P_w = 0.5 C_w \rho_o V^2 \tag{3}$$

여기서, C_w = 압력계수(무차원)

ρ_o = 외부공기밀도, kg/m^3

V = 바람속도, m/s

압력계수 C_w 는 -0.8 내지 0.8의 값을 갖는데, 바람머리 방향의 벽에 대한 값은 정압, 그 반대쪽은 부압이다. 압력계수는 건물의 형상에 따라 달라지며, 국부적으로 벽면에 따라 변한다. 대체로 풍속은 지표면이 높아짐에 따라 증가한다. Sachs 등은 풍속변화와 압력계수의 관계에 대해 자세히 규명하였으며, Shaw 등은 건물의 틈새 바람에 대해 많은 연구를 하였다.

풍속 15.6 m/s 의 바람은 압력계수 0.8로서 120 Pa의 압력을 생성한다. 문과 창문등이 기밀하게 유지된 건물내에서 기류에 미치는 바람의 영향은 미비하지만, 개방문이나 창문을 갖는 건물이나 기밀치 못한 구조를 갖는 건물에서는 이러한 영향을 중요하게 된다. 보통 기류의 영향은 복잡하므로 컴퓨터로 해석하는 것이 요구된다.

화재발생시 종종 화재구획부에 있는 유리는 파손된다. 창문이 건물의 바람머리 반대쪽에 위치해 있으면 바람에 의한 부압으로 인하여 화재구획부로부터 연기는 통풍된다. 이것이 건물을 통한 연유동을 감소시킨다. 그러나 파손된 창문이 바람머리 쪽에 있으면 바람으로 인해 연기는 화재층에

서 다른 층으로 이동하게 되어 건물재실자에게 위해를 주며, 진화를 방해하게 된다. 이런 상황에서 바람에 의해 유발되는 압력은 커질 수 있으며, 이러한 압력은 건물내 연유동을 지배하게 된다.

5) HVAC시스템

건물에 화재가 발생할 때 시스템을 통해 종종 연기는 이동하게 된다. 이러한 이유로 연제어의 개념이 발전되기 전에 시스템은 화재가 발견될 때 닫혀진다.

화재 초기의 단계에서 시스템은 화재를 감지하는데 도움이 될 수 있다. 건물의 비재실부에서 화재가 출화될 때 시스템을 통해 연기가 전파되어 사람들이 후각으로 느끼게 되어 화재에 대처하는데 도움을 줄 수 있다. 그러나 화재가 성장함에 따라 시스템을 통하여 모든 지역에 연기가 전파되게 되어 재실자에게 위해를 주게 된다. 또한 시스템을 통해 화재실로 공기가 공급되게 하는데 이는 폭발을 도와주게 된다. 시스템이 폐쇄되어 화재실로 공기가 공급되는 것을 막을지라도 굴뚝효과, 부력, 바람에 의해서 급·환기덕트, 에어 샤프트, 기타 건물개구부를 통해 이루어지는 연유동을 차단하지는 못한다.

2. 연조절(SMOKE MANAGEMENT)

본장에서는 재실자, 소방관의 안전 그리고 재산상의 손실을 줄이기 위하여 개별적 또는 조합적으로 연유동을 조절할 수 있는 연조절이 포함되어 있다. 장애물, 배연구 그리고 배연샤프트는 전통적으로 연조절을 조절하는데 이용되어 왔다.

연유동을 제한하는 장애물의 효과는 장애물의 누설경로에 따라 달라진다. 벽과 바닥의 파이프 관통부와 벽과 바닥 접합부의 틈새 그리고 문 주변의 틈새는 누설경로가 된다. 이러한 장애물간의 압력차는 굴뚝효과, 부력, 바람 그리고 HVAC 시스템에 영향을 받게 된다.

배연구와 배연샤프트의 효과는 화재에 근접한 정도, 연기의 부력 그리고 다른 추진력에 의해 달라진다. 연기가 스프링쿨러에 의하여 차게 되어

지면 배연구와 배연샤프트의 효과는 감소한다.

엘리베이터 샤프트는 배연샤프트로서 이용되어 왔는데, 이것은 피난을 위한 그 사용을 제한하며, 그리고 종종 이러한 샤프트를 통해 화재로부터 멀리 떨어진 층으로 연기는 이동하게 된다. 특별하게 계획된 배연샤프트는 화재층보다 층간누설이 본질적으로 없으므로 비화재층으로 연기가 전파되는 것을 막을 수 있다.

3. 원리(PRINCIPLES)

연제어는 기류와 기계적인 팬에 의해 발생하는 압력차와 관련하여 전통적으로 연조절을 위하여 장애물(벽, 바닥, 문)을 이용하고 있다.

그림-6은 연유동을 조절하기 위해 동작하는 장애물간의 압력차를 예시한 것이다. 장애물의 안쪽은 문이다. 개구부의 고압측은 피난역이나 피난로가 될 수 있다. 저압측은 화재로부터 발생되는 연기로 충전되어 있다. 개구부 주변의 틈새와 다른 구조물의 틈새를 통한 기류로 인해 고압측으로 연기의 침투는 이루어지지 않는다. 개구부가 개방될 때 공기는 개구부를 통해 흐르게 된다. 기류속도가 낮을 때 연기는 그림-7에 나타나 있는 바와 같이 피난역 또는 피난로 속으로 기류와 반대방향으로 흐르게 된다. 이러한 연기의 역류는 기류속도가 상당히 크게되면 방지할 수 있다(그림-8). 역류를 방지하기 위해 필요한 속도의 크기는 화재시 발생하는 에너지의 방사율에 관계하게 된다.

연제어에 대한 기본적인 두가지 개념은 다음과 같다.

- ① 평균 공기속도가 충분히 큰 크기이면 기류는 그 자체에 의해 연유동을 제어할 수 있다.
- ② 장애물간의 기압차가 연유동을 조절하는데 작용할 수 있다.

가압은 폐쇄물의 조그마한 틈, 건축물의 틈새를 통한 기류의 결과이며, 이로써 이러한 개구부를 통한 연기의 역류를 방지한다. 따라서 물리적인 의미로서는 ②항이 ①항의 특별한 경우가 된다. 그러나 두개의 이론을 분리하여 생각하는 것이 연제어 계획상 유리하다. 1개 또는 여러개의 커다

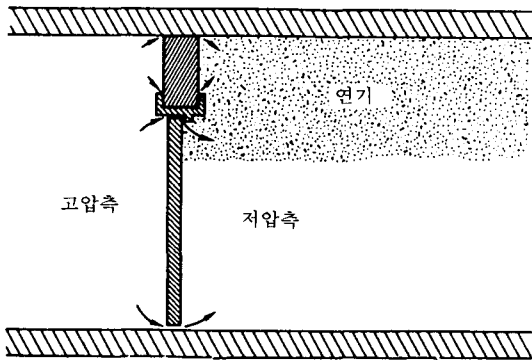


그림-6. 장애물 고압측으로 침입하는 연기를 방지하는 연제어 시스템의 장애물간의 압력차

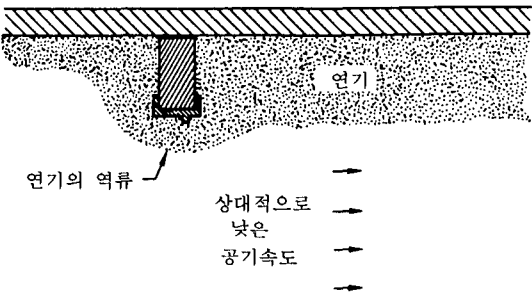


그림-7. 개구부를 통과하는 상대적으로 낮은 공기속도에 대한 연기의 역류

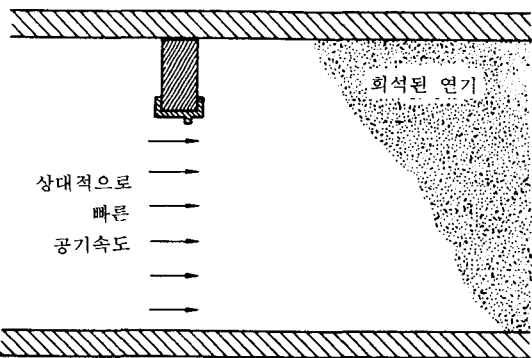


그림-8. 개구부를 통한 빠른 공기속도를 갖는 연기의 비역류

란 개구부를 갖는 장애물에 대해서는 기류속도가 계획에 대한 고려나 납득할 수 있는 시험을 위한 적절한 물리적 양이 된다. 그러나 폐쇄문 주위에서

와 같이 단지 조그마한 틈새가 있을 때는 기류속도를 계획하거나 측정하는 것이 실행상 불가능하므로 이러한 경우의 적절한 물리적양은 압력차가 된다. 두개의 이론을 분리해서 고려하면 개방문과 폐쇄문에 대해 각기 다른 고려가 필요하게 된다.

연제어는 팬의 작동으로 인한 기류의 속도와 압력차에 관련되는 것으로 전통적인 연조절방법에 대해 다음과 같은 이점을 갖는다.

- 연제어는 기밀한 장애물과는 거의 관련이 없다. 장애물을 통해 이루어지는 적당한 누설은 계획상 허용될 수 있다.
- 굴뚝효과, 부력 그리고 바람에 의한 연제어의 효과는 수동적인 연조절보다 떨어진다. 연제어를 행하지 않을 시, 이러한 추진력은 누설 경로를 통하여 어느정도 연유동을 일으킨다. 그러나 연제어 시스템의 압력차나 기류는 이러한 추진력에 반대로 작용한다.
- 연제어는 장애물에서 개구부를 통해 이루어지는 연기의 흐름을 방해하기 위해 기류를 이용할 수 있다. 장애물내에 있는 문들은 피난하는 동안 열리게 되며, 때에 따라서는 우발적으로 열려 있게 되고, 화재시 열려 있도록 해야 한다. 연제를 행하지 않을시 연기는 통상 이러한 개구부를 통하여 흐르게 된다.

연제어 시스템을 계획함에 있어서는 외부로 연유동이 이루어지도록 경로를 갖게끔 계획되어야 하는데, 이러한 경로를 통해 화열에 의한 가스팽창압력이 경감된다.

화재실에서의 연기의 희석(또는 퍼지)으로는 연제어를 달성하지 못한다. 즉, 연유동은 화재가 위치한 장소나 구역으로 단순히 상당한 양의 공기를 급기하거나 배기한다고 해서 조절될 수 있는 것은 아니다. 이러한 공기의 급배기가 가끔 연기를 퍼지하는 것에 관련된다. 화재는 많은 양의 연기를 생성하므로, 퍼지를 행한다고 해서 화재실이 호흡할 수 있을 만큼의 충분한 공기를 확보할 수 없다. 아울러 퍼지를 행하는 것이 연유동을 조절할 수는 없는데 이는 개방문이나 장애물간의 압력차에 필요한 기류를 제공하지 못하기 때문이다. 그러나 연장벽에 의해 화재실로부터 분리된실에서 퍼지를 행하는 것은 상당히 연기의 농도를

제한할 수 있다.

1) 기류(Airflow)

이론적으로 기류는 어떤 공간을 통해 이루어지는 연유동을 멈추게 할 수 있다. 연유동을 조절하는데 가장 보편적으로 사용되는 기류속도가 있는 장소는 개구부와 복도이다. Thomas에 의해 연구된 다음과 같은 경험적인 관계는 복도에서 상승기류에 의해 생기는 연유동을 방지하기 위한 임계속도를 나타낸 것이다.

$$V_k = 0.0292(E/w)^{1/2} \quad (4)$$

여기서, V_k = 연기의 역류를 방지하기 위한 임계속도, m/s

E = 복도로의 에너지 방사율, W

W = 복도폭, m

이 식은 화원이 복도에 위치하거나 연기가 개구부, 급기그릴 또는 다른 개구부를 통해 복도로 들어가는 때에 이용될 수 있다. 그러나 이 식으로 계산된 임계속도는 크기가 다른 화재로부터 나오는 연기의 역류를 방지하기 위한 기류속도를 나타내는 것이다.

식(4)는 그림-9로부터 그 값을 구할 수 있다. 예를들어 폭 1.2m의 복도로 방사되는 에너지 방사율이 150kW이면 임계속도는 1.45m/s가 된다. 그러나 보다 큰 2.1MW의 에너지 방사율에

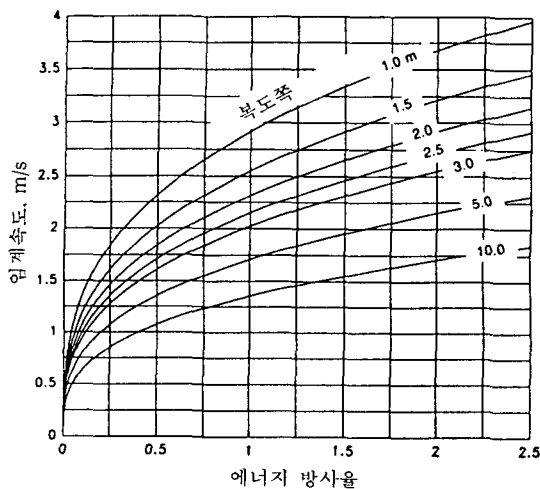


그림-9. 연기의 역류를 방지하기 위한 임계속도

대해 임계속도는 같은 폭의 복도에서 3.05m/s가 된다.

일반적으로, 빠른 기류속도를 계획하는 것은 비용이 많이 들고 어려운 연제어시스템을 필요로 한다. 연제어 시스템 영역으로 작용하는 개구부를 통한 연기의 역류를 방지하는데 있어 가장 중요한 것은 기류이다. Thomas는 문을 통한 연기의 역류를 방지하기 위한 기류의 평가로서 식(4)를 제시하였다. 출입구내를 1.5m/s보다 더 크게 유지하기 위해 시스템을 계획하는 것은 막대한 금액이 요구된다.

상승공기와 하강가스사이 에 적은 온도차를 갖는 스프링클드 화재(Sprinkled fire)에서 식(4)는 적절하지 않다. Shaw등은 개구부를 통한 오염공기의 역류를 방지하는데 필요한 속도를 결정하는 방법의 분석을 제시하였다. 이러한 분석은 특히 적은 온도차에 해당되는 것으로 자연대류의 효과를 포함하고 있다. 온도차가 단지 2°C 정도인 스프링클드 화재에 대해서 0.25m/s의 평균속도는 개구부를 통한 연기의 역류를 방지하기 위하여 필요한 최소한의 속도이다. 이 온도차는 적으며, 보다 큰 값이 여러 상황에서 적절한 것이 될 것이다.

기류가 연유동을 조절할 수 있을지라도 이러한 시스템을 효과적으로 운용하기 위해 요구되는 다량의 공기때문에 연제어의 근본적인 방법은 아니다. 근본적인 수단 은 칸막이, 문 그리고 기타 건물요소들간에 생기는 기압차에 의한 것이다.

2) 가압(Pressurization)

구조체의 틈새, 문틈 또는 기타 기류경로를 통한 흐름율은 힘n을 유발하는 경로사이의 압력차에 비례한다. 고정된 형상의 흐름경로에서 n은 이론적으로 0.5와 1사이의 값이다. 그러나 극히 작은 틈새를 제외한 모든 흐름경로에서는 n은 0.5이며, 흐름은 다음과 같이 표현된다.

$$Q = CA(2\Delta p/\rho)^{1/2} \quad (5)$$

여기서, Q = 용적흐름율

C = 흐름계수

A = 흐름면적(누설면적)

Δp = 흐름경로간의 압력차

ρ = 흐름경로로 유입하는 공기밀도.

흐름계수는 난류나 마찰과 마찬가지로 흐름경로의 형상에 따라 다르다. 이러한 현재의 상황에서 흐름계수는 보통 0.6에서 0.7의 범위의 값을 갖는다. ρ 가 1.2kg/cm^3 이고 C 가 0.65일 때에 상기의 흐름방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$Q=0.839(\Delta p)^{1/2} \quad (6)$$

여기서, Q =용적흐름율, m^3/s
 A =흐름면적, m^2
 Δp =흐름경로간의 압력차, Pa

흐름면적은 종종 흐름경로상의 단면적과 같게 된다. 틈새면적이 0.01m^2 , 압력차가 2.5Pa 인 폐쇄문의 공기누설율은 약 $0.013\text{m}^3/\text{s}$ 가 될 것이다. 문 사이의 압력차가 75Pa 로 증가하면 흐름은 $0.073\text{m}^3/\text{s}$ 가 될 것이다.

연제어 시스템의 야외시험에서는 빈번하게 칸막이나 또는 폐쇄문 사이의 압력차가 5Pa 정도로 변동한다. 이러한 변동은 HVAC 시스템이나 다른 원인에 의해서도 기인한 것이지만 대체로 바람에 의한 것이다. 연유동을 제어하기 위해서 연제어 시스템에 의해 생기는 압력차는 압력변동, 굴뚝효과, 연부력 그리고 풍력 등에 압도되지 않는 충분한 크기의 것이어야 하지만, 문을 개방하는데 있어 문체를 초래하는 크기의 것이어서는 안된다.

4. 퍼지(PURGING)

앞서 언급한 바와 같이, 퍼지를 행하는 것이 화재가 연소하고 연기를 생성하는 화재실을 호흡 가능한 영역으로 해주는 것은 아니다. 그러나 퍼지를 행하면 화재진화 후 화재실로부터 연기를 제거할 수 있다. 화재후 퍼지를 행하는 것은 소방관이 화재의 완전진화여부를 조사하거나 검증할 수 있게 하는데 필요하다. 전통적으로 소방관은 문의 개방, 창문의 파괴나 개방을 하여 퍼지를 행하였다. 이러한 조치가 적절하지 않은 공간에서는 퍼지의 작동기능을 갖춘 HVAC 시스템이 요구될 것이다.

본장에서 논하는 시스템은 일반적으로 연제어의

두가지 기초이론에 입각하고 있지만, 방호해야 하는 공간으로 부터 투입하는 연기를 방지하기 위해 개방문을 통해 충분히 큰 기류를 항상 유지할 수 있는 것은 아니다. 이론적으로 문의 개방은 피난시 단지 짧은 시간에만 이루어진다. 이러한 공간으로 유입한 연기는 실에 외기를 공급함으로써 퍼지되거나 희석될 수 있다.

연장벽과 자동폐쇄문으로 화재로부터 차단되어 있는 구획부를 예로들면, 문이 폐쇄되어 있을 때는 구획부로 유입되는 연기는 없다. 그러나 하나 이상의 문이 개방되어 있을 때, 기류로써 화재실에서 구획부로 유입하는 연기를 제어하는 것은 충분하지 못하다. 분석을 하기 위해 연기는 구획부에서 균일한 농도를 갖고 있다고 가정한다. 모든 문이 폐쇄되어 있을 때의 화재구획부의 오염농도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C/C_0=e^{-at} \quad (7)$$

여기서, C_0 =초기오염농도
 C = t 시간에서의 오염농도
 a =퍼지율, 분당 공기 변화수
 t =문을 폐쇄한 후의 시간, min
 e =지수함수, 약 2.718

농도 C_0 와 C 는 동일한 단위이어야 하며, 특별한 농도를 고려할 때는 적절한 어떤 단위 가능하다. McGuire등은 상당한 레벨의 불명료연(Smoke Obscuration)에 대해 행한 많은 시험과 다수의 제안된 기준으로부터 불명료연의 최대레벨을 평가하였다. 이러한 평가에 기초하여 불명료연의 최대레벨은 참음한계에 관련있는 계수 100보다 크게 된다. 화재구역으로 부터 유출되는 공기에 의해 어떤 구역의 공기가 1%이상 오염되지 않으면, 이러한 것은 그 구역이 불명료연에 대하여 "안전에 적당하다"는 것을 말하는 것이다. 또한 이러한 희석으로 독성을 가진 연기의 성분농도를 감소시킨다. 유독성은 보다 복잡하며, 유독성가스에 대해서는 안전한 공기환경을 연기 위해 필요한 희석과 같이 동일하게 서술되지 않는다.

식(7)은 퍼지율을 계산하기 위한 것이다.

$$a=1/t \ln(C_0/C) \quad (8)$$

예를들어, 문이 개방되었을 때 구획부의 오염도가 화재실 농도의 20%이면, 문폐쇄후 6분후의 오염농도는 화재실의 1%이며, 식(8)은 구획부가 매 2분마다 1회의 공기변화율로 퍼지해야 한다는 것을 나타낸다.

오염농도는 실제로 구획부에서 일정하지 않은데, 이는 부력과 고농도의 오염으로 가까운 천장에 정체하려는 경향 때문이다. 따라서 천장근처의 입구에서 배기를 하고, 바닥 근처의 출구에서 급기하는 것은 아마도 상기의 계산에서 표시된 것보다 더 빠른 연기의 퍼지가 될 것이다.

5. 문개방력(DOOR-OPENING FORCES)

연제어 시스템에 의해 생기는 압력차로 인한 문개방력을 고려하여야 한다. 불합리하게 높은 문개방력은 재실자가 문을 열고 피난구역이나 피난로로 대피하는 것을 어렵게 할 수 있다.

문을 개방하는데 필요한 힘은 문사이의 압력차를 극복하는 힘과 문폐쇄기를 작동시키는 힘의 합이 되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_{dc} + wA \Delta p / 2(W - d) \quad (9)$$

여기서, F = 전체문개방력, N

F_{dc} = 문폐쇄기를 작동시키는 힘, N

w = 문축, m

A = 문면적, m^2

Δp = 문사이의 압력차, Pa

d = 문 손잡이에서 가장자리까지의 거리

이 식은 문개방력이 손잡이에 적용되는 것을 나타낸다. 압력차에 따른 문개방력은 그림-10으로부터 결정될 수 있는데 이는 $d=75mm$ 에 대한 것이다. 문폐쇄기를 작동시키는 힘은 보통 13N 이상이나 경우에 따라서는 90N정도가 될 수 있다. 높이가 2.1m, 폭이 0.9m, 압력차가 75Pa인 문에서 문폐쇄기를 작동시키는 힘이 53N이면 전체문개방력은 133N이다.

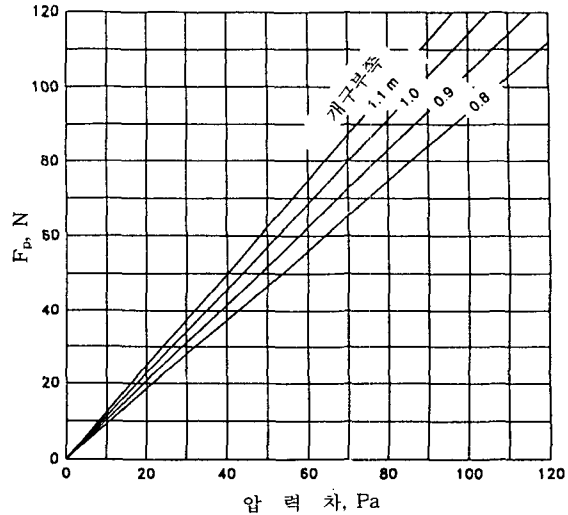


그림-10. 압력차에 의한 문개방력

6. 흐름면적(FLOW AREAS)

연제어 시스템을 계획하는데 있어 알아야 하고 평가되어야 할 요소는 기류의 경로이다. 폐쇄문, 개방문, 엘리베이터 문, 창문 그리고 공기를 이동시키는 그릴과 같은 틈새에서의 누설경로는 명확한 것인데 반해, 건물벽체의 구조적인 틈새는 명확하지 않으나 중요한 요소이기는 마찬가지이다.

개방창문과 같이 대부분 큰 개구부에서의 흐름면적은 손쉽게 계산될 수 있으나 틈새에서의 흐름면적을 평가하는 데는 꽤 어렵다. 이러한 누설경로면적은 문이 얼마나 잘 조립되어 있는지 또는 부속물이 얼마나 잘 설치되었는가 하는 기술에 따라 달라진다. 평균 틈새폭 3.2mm를 갖는 0.9m×2.1m 크기의 문 누설면적은 0.020 m^2 이다. 그러나 이 문이 19mm의 언더컷(Undercut)로 설치되어 있으면, 누설면적은 상당한 차이가 있는 0.030 m^2 로 된다. 엘리베이터 문은 개구부당 0.051에서 0.065 m^2 의 누설면적을 갖는다.

개방복도 출입구에서는 흐름패턴이 복잡하고 개방출입구를 통해 얻어진 흐름값은 식(6)에 있는 흐름면적으로서 기하학적인 출입구 면적을 사용하여 계산된 흐름보다 상당히 낮은 값을 갖는다는 것을 Creci는 알아냈다. 개방복도의 출입구에 대한 또 다른 대안은 흐름면적으로서 기하학적인 면적

을 이용하는 것과 감소된 흐름계수를 이용하는 것이다. 식(6)을 직접 이용할 수 없으므로 이러한 대안은 여기서 이용되지 않는다.

표-1은 상업빌딩의 벽과 바닥에 대한 기준 누설 면적의 면적비를 나타낸 것이다. 이러한 데이터는 비교적 적은 시험을 거쳐 얻어진 결과로서 National Research Council of Canada에 의해 행해진 것이다. 면적비는 벽체에 대해서 $75P_a$, 바닥에 대해서는 $25P_a$ 의 기준기류에서 평가된 것이다. 실제 누설 경로는 구조체의 재질보다는 주로 기술이 달려 있으며, 경우에 따라서 특별한 건물에서의 흐름면적은 제시된 값이 변할 수도 있다. 건물요소를 통해 이루어지는 공기누설에 관한 데이터는 1989 ASHRAE Handbook-Fundamentals 의 23장을 참조하기 바란다.

환기구 표면은 보통 루버나 스크린으로 씌어져 있으므로 환기에 의한 흐름면적은 그 면적(환기구 높이×폭)보다 적다. 루버속의 슬레이트는 종종 비스듬이 설치되어 있으므로 흐름면적에 대한 계산은 더욱 복잡해진다. 특별한 정보는 제조업자의 데이터를 참조하면 된다.

표-1. 상업빌딩에서의 벽과 바닥에 대한 기준누설 면적

Construction Element	Wall Tightness	Area Ratio A/A_w
Exterior building walls (includes construction cracks, cracks around windows and doors)	Tight	0.70×10^{-4}
	Average	0.21×10^{-3}
	Loose	0.42×10^{-3}
Stairwell walls (includes construction cracks, but not cracks around windows or doors)	Very Loose	0.13×10^{-2}
	Tight	0.14×10^{-4}
	Average	0.11×10^{-3}
Elevator shaft walls (includes construction cracks, but not cracks around doors)	Loose	0.35×10^{-3}
	Tight	0.18×10^{-3}
	Average	0.84×10^{-3}
Floors (includes construction cracks and areas around penetrations)	Loose	0.18×10^{-2}
	Average	0.52×10^{-4}
		A/A_f

A =leakage area ; A_w =wall area ; A_f =floor area

<다음호에 계속>