

制煙設備의 設計概念

韓一技術研究所* 計劃·開發室

On the Design Concept of Smoke Control Systems

Han-il Engineering Consultants
Dept. of Planning & Research

序 論

최근 신축건물 및 도심재개발사업 등에 있어서 건축물의 大型化, 高層化와 함께 대규모 복합용도의 건물이나 地下街등 화재에 취약한 특성을 가진 건축물이 급격히 늘어남에 따라, 건축물에서의 人命安全과 財産保護를 위한 종합적 防災對策의 필요성이 절실히 요구되고 있으며, 그중에서도 특히 火災時 피난 및 소화활동에 막대한 지장을 초래하고, 人命安全에 가장 큰 위협이 되고 있는 연기(연소생성물, 가연성의 가스, 유독성 기체등을 총칭한다)를 제어하기 위한 “배연설비”의 중요성은 더욱 비중이 높아지고 있다. 이에 대해 선진외국에서는 이미 많은 연구와 실험이 진행되어 여러가지 효과적인 制煙方式을 開發·適用하고 있으나, 우리나라에서는 아직 制煙設備에 대한 인식이 전체적으로 부족하고, 그 방호개념과 기술적 방향이 정립되어 있지 못하여, 많은 혼란과 경제적 손실을 초래하고 있는 실정이다. 이는 人命安全의 중요도에 대한 社會全般의 인식이 결여되어 있고, 建築主나 건축설계자의 防災對策에 관한

理解不足, 防災關聯技術人들의 努力不足, 관계법규(건축법, 소방법등) 및 기술기준의 非合理性등이 주된 원인이라 생각된다. 방재설비는 건물의 계획단계에서부터 건축적, 설비적 방호개념을 명확히 설정하여 設計, 製作, 施工, 유지관리 및 運用에 이르기까지 일관된 체계로 추구되어야 소정의 목적을 달성할 수 있으므로, 해당 각 분야의 총체적 관심과 분발이 촉구되며, 특히 관계법규의 정비와 함께 경직된 법규운용의 止揚, 새로운 防災技術을 수용할 수 있는 유연성의 부여가 시급한 실정이다. 이러한 관점에서 볼 때, 우선 制煙設備의 概念정립이 先決과제로 판단되어, 이에 대해 선진외국의 여러가지 制煙方式— 주로 設備의인 방법을 위주로 —에 대한 관계문헌을 참고·정리하여 그 대강을 소개하고자 한다.

1. 制煙設備의 概要

1.1 目的

制煙設備은 火災時 연기로 인한 질식사망,

* 特別會員社

부상등 人命과 財産의 피해를 극소화하고, 안전한 피난로와 대피구역을 형성하며, 소화활동을 용이하게 함을 그 목적으로 한다.

1.2 制煙方式의 種類

화재시 연기를 제어하는 방법으로는 크게, 건축적인 방법과 設備的인 방법의 두가지로 나눌 수 있는데, 건축적인 방법으로는 건물을 적절한 규모로 구획하여 연기의 전파속도를 억제하는 防煙 (Smoke Defence), 自然力에 의해 화재구역內的 연기를 배출시키는 排煙 (Smoke Venting) 등이 있고, 設備的인 방법으로는 화재구역內的 연기를 機械力에 의해 강제배기시키는 機械排煙方式과 어떤 공간內的 연기농도를 저하시키기 위해 급기와 배기를 행하는 換氣方式 (Ventilation), 급기에 의한 加壓으로 연기의 침입을 방지하는 給氣加壓方式 (Pressurization) 등이 있다. 이러한 制煙設備는 건물內的 방호대상에 따라 적절히 선택·適用되어야 하며, 전체 시스템으로서의 성능이 원활하도록 계획되어야 한다.

우리는 흔히 “배연설비”라는 용어를 Smoke Control System의 총칭처럼 사용해 오고 있으나, 혼동을 피하기 위해 여기서는 본래의 협의적 개념인 Smoke Venting에 의한 방법으로 국한시키고, 대신 “제연설비”란 용어를 쓰기로 한다.

1.3 制煙設備의 計劃時 고려사항

制煙設備의 成敗는 건축계획에 크게 영향을 받는 것으로, 우선 건축적인 수단에 의해 防火·防煙對策이 강구되지 않으면 設備的 수단 自體만으로는 效果를 기대하기 어렵다. 아래에 制煙設備의 계획과 관련하여 고려해야 할 주요사항을 열거한다.

<건축관계>

- ① 건물의 外形的 특성 - 높이, 층수, 면적, 外皮의 구조등
- ② 건물의 使用上 특성 - 용도, 거주인원밀도, 거주인원의 행동특성, 비상계단등의 사용빈도, 각종 문의 개폐상태등
- ③ 건물의 耐火특성 - 구조 및 건축재료의 耐火성능, 내장재의 화재특성, 防火·防煙計劃, 건물의 누설특성 등
- ④ 외부환경특성 - 건물의 立地조건, 인접건물과의 관계, 교통계획, 건물주위의 기류, 외부기상조건등
- ⑤ 火災환경특성 - 화재위험도, 火災荷重, 消防隊의 對應特性등
- ⑥ 피난계획 - 탈출피난 및 일시피난계획, 피난시간, 인명구조裝具등

<설비관계>

- ① 외부기상조건 - 온도, 풍속, 풍향, 건물주위의 압력분포등
- ② 소화설비의 특성 - 스프링클러설비의 有無, 각종 소화설비의 형식 및 성능
- ③ 화재조기 경보시스템 - 화재감지 및 경보장치의 형식, 성능, 특성
- ④ 공조설비 시스템 - 공조, 환기등 설비의 형식, 성능, 특성등
- ⑤ 자동제어 시스템 - 건물중앙제어 시스템의 특성, 운영관리수준

또한 制煙設備를 계획함에 있어서는 適用소화설비와의 관계에 대한 충분한 검토가 필요하다. 예를들면 스프링클러설비가 갖추어져 있는 경우에, 화재시 살수냉각에 의해 화염의 규모가 축소되고 연기의 온도도 낮은 상태로 유지되는 특성이 있으며, 스프링클러 살수로 인해 공기저항이 증가하여 제연설비에 필요한 給排氣가 원활치 못한 경우도 있다. HALON, CO₂ 등 가스에 의한 질식소화시스템의 경우에는 給排氣를 행하면 소화효과가 감소하므로 制煙設備를 적용

하지 않는 것이 바람직하다.

기타, HVAC 시스템 및 자동제어 시스템과의 상호관계에 대해 어떤 문제가 없는가를 신중히 검토, 보완하여야 하며, 制煙設備의 容量은 어느 정도 여유를 두어, 건물의 누설특성의 변화, 시공에 따른 오차, 사용상태의 변경등 設計時 정확히 계산할 수 없는 要素에 대해, 實際은 전시 조정이 가능하도록 시스템에 유연성 (Flexibility)을 부여하는 것이 특히 중요하다.

2. 연기의 전파에 관한 기초이론

화재시 발생하는 연기의 전파특성을 결정하는 要因으로는,

- ① 굴뚝효과 (Stack Effect)
- ② 부력 (浮力; Buoyancy)
- ③ 팽창 (Expansion)
- ④ 풍압효과 (Wind Effect)
- ⑤ 공조설비 시스템 (HVAC System) 등이

있으며, 이러한 要因들의 복합작용에 의해 연기移動이 발생한다.

2.1 굴뚝효과 (Stack Effect)

건물의 외부온도가 실내온도보다 낮을 때는, 건물내부의 공기는 밀도차에 의해 상부로 이동하게 되고, 이로 인해 건물의 높이에 따라 어떤 압력차가 형성 (그림 1) 되는데, 이런 현상을 굴뚝효과라고 하며 이 때의 壓力差는,

$$\Delta P = (\rho_o - \rho_i) \cdot g \cdot h \text{ 로 표시된다.}$$

ΔP ; 압력차

ρ_o, ρ_i ; 외부공기, 실내공기의 밀도

g ; 중력가속도

h ; 中性帶 (Neutral Plane)로 부터의 높이

여기서 공기를 理想氣體라 가정하여, 理想氣體式

$P = \rho RT$ 를 적용하면,

$$\Delta P = \frac{g \cdot P}{R} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) h$$

$$\Delta P = K_s \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) \cdot h \dots (2.1 \text{ 식})$$

ΔP ; 압력차 (Pa)

P ; 대기압 (절대압력, Pa)

R ; 공기의 기체상수

T_o, T_i ; 외부, 실내공기의 절대온도 (°K)

K_s ; 상수 (표준대기압의 경우, 3460)

h ; 中性帶로 부터의 높이 (m)

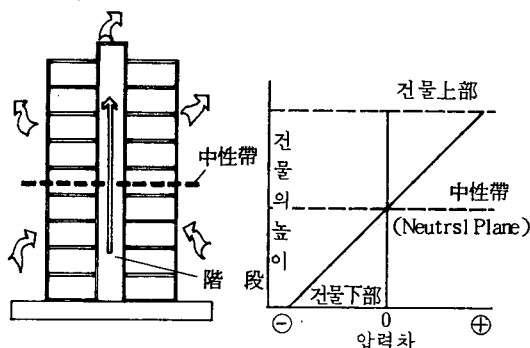


그림 1. 굴뚝효과에 의한 압력차

굴뚝효과에 의한 연기이동의 특성을 살펴보면,

① 中性帶 (Neutral Plane) 하부층에서 화재가 발생한 경우 연기는 건물의 深部로 침투하면서 상부층으로 이동하며, 연기자체의 온도에 의한 부력으로 상승속도가 더욱 증가한다.

② 中性帶의 상부층에서 화재가 발생한 경우 연기는 건물외부로 누출되면서 상승하고 연기 자체온도에 의한 부력으로 상승속도가 더욱 증가한다.

③ 여름과 같이 실내온도보다 외기온도가 더 높은 경우 압력형성이 반대로 되어 역굴뚝효과가 일어나지만, 연기자체의 온도에 의한 부력효과가 훨씬 크기 때문에 연기는 상부층으로 이동한다. 이때 역굴뚝효과에 의한 공기하강작용은 부력에 의한 연기의 상승속도에 약간의 저항으로 작용하는 정도이다.

2.2 부력 (浮力, Buoyancy)

화재시 발생하는 고온연기는 밀도가 감소되어 부력이 발생한다. 이 때 화재구역과 주위의 압력차 (그림 2. 참조)는

$\Delta P = K_s \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_f} \right) \cdot h \dots\dots (2.2 \text{ 식})$ 으로 표시된다.

- ΔP : 압력차 (Pa)
- K_s : 상수 (3460)
- T_o, T_f : 주위 공기, 화재부분의 절대온도 (°K)
- h : 中性帶 로 부터의 높이 (m)

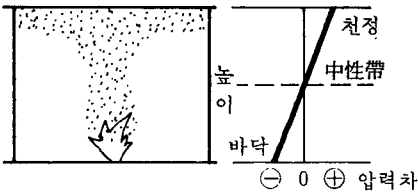


그림 2. 부력에 의한 압력차

부력에 의해 상승된 연기는 천정부에서 측면으로 퍼져나가면서 열전달, 회색등에 의해 온도가 떨어지고, 화재역으로부터 거리가 멀어짐에 따라 부력효과가 점차 감소한다. 또한 부력에 의한 압력차 때문에 연기는 화재구역의 문, 벽등 누설틈새를 통해 다른 구역으로 이동하며, 특히 화재실 천정에 누설틈새가 있는 건물에서는 이 부력효과에 의해 연기는 급격히 상부층으로 이동한다.

2.3 팽 창 (Expansion)

화재로 인해 방출되는 에너지는 팽창에 따른 연기유동을 야기시킨다. 개구부가 하나뿐인 화재구역을 가정해 보면 공기는 개구부의 하부를 통해 화재구역으로 이동하고, 연기는 개구부의 상부를 통해 나올 것이다. 이때 연소에 의한 물질이동을 무시한다고 하면 다음 관계가 성립된다.

$$\frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{T_{out}}{T_{in}} \dots\dots\dots (2.3 \text{ 식})$$

- Q_{in} : 공기의 체적유량 (m³/sec)
- Q_{out} : 연기의 체적유량 (m³/sec)
- T_{in} : 공기의 절대온도 (°K)
- T_{out} : 연기의 절대온도 (°K)

기밀이 잘 유지되고 있는 화재실의 경우 팽창에 의한 압력차는 크게 발생한다.

2.4 풍압효과 (風壓效果 : Wind Effect)

문이나 창문 등의 기밀성능이 좋고 누설이 거의 없는 구조체의 건물에서는 화재초기에 연기의 유동에 미치는 풍압효과는 경미하다. 그러나 개방창, 개방문이 있는 건물이나, 누설이 많은 구조, 화재시 창문의 파손이 발생하였을 경우에 풍압효과에 의한 영향은 대단히 중요하다.

건물에 미치는 풍압효과는,

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot C_w \cdot \rho_o \cdot V^2 \text{로 표시된다.}$$

- P_w : 풍압효과
- ρ_o : 외기의 밀도
- V : 풍속
- C_w : 압력계수 (無次元數)

위 식을 변형하면,

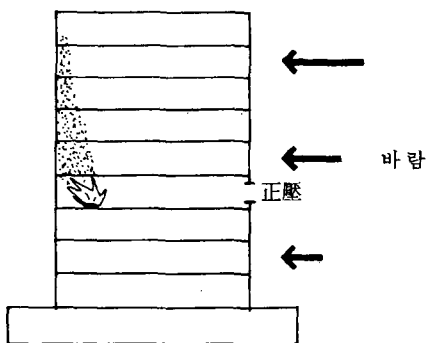
$$P_w = C_w \cdot K_w \cdot V^2 \dots\dots\dots (2.4 \text{ 식})$$

- P_w : 풍압 (Pa)
- K_w : 표준상태의 계수 (공기비중량 1.2 kg/m³ 일때, 0.600)
- V : 풍속 (m/sec)
- C_w : 압력계수 (0.8 ~ -0.8의 범위), 건물의 형상, 풍향등에 따라 크게 변화하는 값으로 풍향의 前面에서는 ⊕ 값, 後面에서는 ⊖ 값을 갖는다.

바람에 의한 風壓效果는 건물의 누설특성과 크게 관련이 있고 풍속, 풍향, 건물의 형상, 인접 건물과의 상호관계등 건물주위의 기류 및 압력변화를 결정하는 요인들이 아주 복잡하기 때문에 실제적으로는 모델실험에 의한 측정이나 컴

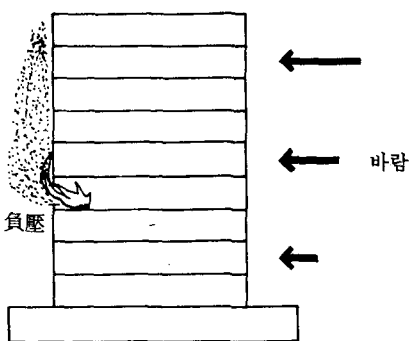
퓨터를 이용한 해석에 의존할 수 밖에 없을 것이다.

참고로, 화재시 창문이 깨어졌을 때의 풍압효과에 의한 연기의 이동양상을 그림 3에 나타내었다.



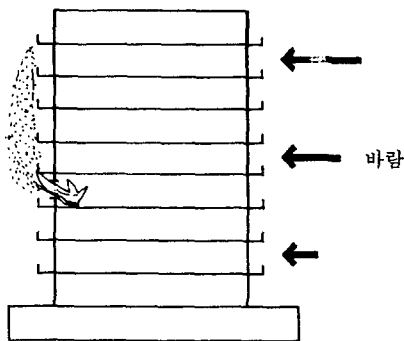
A. 바람 前面의 창문 파손 時

— 풍압효과에 의해 연기의 상승속도증가 (연기로 인한 피해 가중)



B. 바람 後面의 창문 파손 時

— 연기, 화염등이 외부로 누출되면서 건물의 외벽을 따라 상승(소화, 피난에 장애가 되고 상부층으로의 화재전파위험)



C. 발코니등이 있는 경우

— 상부층으로의 화재전파위험이 감소 (건물 외벽으로부터 90cm 이상 발코니 돌출)

그림 3. 풍압효과에 의한 연기의 이동양상

2.5 공조설비 시스템 (HVAC System)

制煙設備의 개념이 발달하기 전에는 화재시 공조·환기설비의 운전은 신선공기의 공급으로 연소를 촉진하고 연기의 이동을 조장한다는 이유로 무조건 운전을 중지시켰다. 그러나 최근의 경향은 공조·환기설비를 필요에 따라 加壓, 排煙등을 위한 制煙設備의 일부수단으로 이용, 초기투자비를 절감하거나, 制煙設備의 效果를 높이는 데 적극적으로 활용하는 추세이다.

3. 制煙設備의 適用概念과 原理

建物內에서의 制煙에 의한 방호대상장소는 크게, i) 피난로 (Escape Route), ii) 화재구역 (Fire Area), iii) 비화재구역 (Non Fire Area) 등으로 나눌 수 있는데, 制煙設備는 이들 대상장소에 따라 그 실시목적, 방법, 착안점 등 근본적인 적용개념을 달리한다.

3.1 피난로 (Escape Route)

피난로는 피난계획에 따라 화재시 인명의 대피에 이용되는 탈출통로로서 人命安全上 가장 중요한 장소이므로, 충분한耐火성능과 強度를 가지며 철저한 방화구획으로 형성되어야 한다.

피난로의 구성은 건물의 특성에 따라 약간씩 달라지나, 대개 피난복도, 계단실 및 계단전실, 비상 Elev. 및 전실등으로 구성되며, 거주밀도가 높은 高層건물의 경우 피난시간을 줄이기 위해 常用 Elev. 를 피난에 이용할 때에는 常用 Elev. 및 Elev.홀도 방화구획으로 하여 피난로에 포함한다. 피난로는 화재실로부터 침투해 들어오는 연기와 전도열에 의한 온도상승을 방지하여 피난시간동안 실내를 안전하게 유지시켜야 하므로, 외기를 공급, 실내의 기압을 화재실보다 어느 정도 높게 형성시키는 給氣加壓方式 (Pressurization)이 가장 有效하다.

연기의 침입을 방지하기 위한 방법으로는 압력차에 의한 방법과 풍속에 의한 방법이 있다.

1) 압력차 (Pressure Difference) 에 의한 制煙方法

그림 4 A. 와 같이 피난구역과 화재구역의 경계면에서 압력차에 의해 공기가 누설되면서 연기의 침입을 방지하는 방법으로 이때의 누설풍량은,

$$Q = C \cdot A \left(\frac{2\Delta P}{\rho} \right)^n \text{ 로 표시된다.}$$

Q : 풍량 (m³/sec)

C : 유량계수 (0.6 ~ 0.7)

A : 유효누설면적 (m²)

ΔP : 압력차 (Pa)

ρ : 공기비중량 (1.2 kg/m³)

n : 0.5 ~ 1.0 (아주 좁은 틈새의 경우, n = 0.5)

위 식에서 C = 0.65, n = 0.5, ρ = 1.2 kg/m³을 적용하면,

$$Q = K_f \cdot A \cdot \sqrt{\Delta P} \dots\dots (3.1 \text{ 식}) \text{ 로 된다.}$$

여기서 K_f = 상수, (0.839)

2) 풍속 (Air Velocity) 에 의한 制煙方法

피난구역에서의 열려있는 문이나 복도와 같은 통로, 공기 Transfer Grill, 기타 개구부를 통한 연기의 침입을 방지하기 위한 방법으로서 (그림 4 B, 4 C 참조), 공학적 원리는 압력차에 의한 방법과 근본적으로 같다. Thomas의 실험식에 의하면 복도에서의 연기의 逆流를 방지하기 위한 임계풍속은,

$$V_K = K \cdot \left(\frac{g \cdot E}{W \cdot \rho \cdot C \cdot T} \right)^{\frac{1}{3}}$$

V_K : 연기의 逆流방지를 위한 최소풍속 (m/sec)

E : 복도에서의 Energy Release Rate (W)

W : 복도의 폭 (m)

ρ : 上流側의 공기밀도 (kg/m³)

C : 下流側의 가스 (공기와 연기의 혼합물)의 比熱 (KJ/kg°C)

T : 下流側의 가스의 절대온도 (°K)

K : 상수

g : 중력가속도

* 여기서 下流側의 物性値를 선정할 때는 主流路斷面에 걸쳐 비교적 균일한 분포의 物性을 나타내도록 화재원으로부터 충분히 떨어진 지점에서의 物性値를 채택함이 좋다.

위 식에서 ρ = 1.3 kg/m³, C = 1,005 KJ/kg°C, T = 27°C (300°K)로 하면,

$$V_K = K_V \cdot \left(\frac{E}{W} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots (3.2 \text{ 식}) \text{ 으로 된다.}$$

K_V = 상수, (0.0292)

(3.2 식)은 복도와 같이 일정한 斷面形狀을 가진 긴 통로의 경우에, 불의 크기에 따라 연기의 逆流를 방지하기 위해 필요한 임계풍속의 개략치를 계산하는데 적용되나, 열려있는 문, 각종 개구부등에도 큰 오차없이 적용 가능하다. 그러나, 스프링클러등에 의해 냉각된 연기 (Cool Smoke)의 경우에는 자연대류효과에 의한 영향이 커지기 때문에 단위 Energy Release Rate에 대해 상대적으로 큰 풍속이 필요하게 되어, 이 式을 적용하는 것은 적당하지 않다.

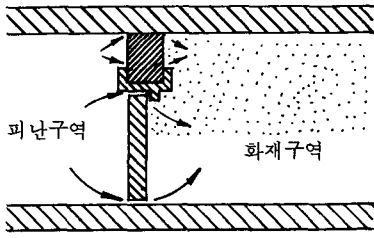


그림 4 A. 압력차에 의한 연기의 침입방지

—좁은 틈새로 공기가 누설되면서 빠른 풍속을 유지하여 연기의 침입을 방지

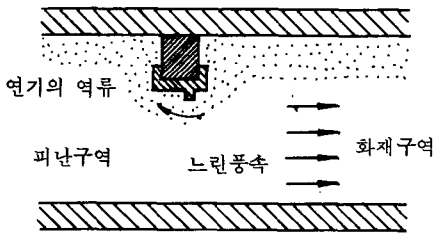


그림 4 B. 개방문을 통한 연기의 역류

—풍속이 느려지면 개방문의 上部로 연기의 逆流현상 발생

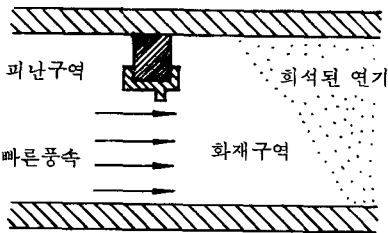


그림 4 C. 풍속에 의한 연기의 역류방지

—충분한 풍속이 유지되면 연기의 침입방지가

3) 환기 (Ventilation)에 의한 制煙方法
 자동폐쇄문에 의해 방화구획된 피난구역에 있어서 문이 닫혀 있는 경우에는 給氣加壓에 의해 충분한 압력이 유지되고 있으므로 연기는 침입하지 않으나, 설계치 이상으로 여러 개의 문이 동시에 열리게 되면 연기의 逆流를 방지하기 위

한 충분한 압력과 풍속이 유지되지 못하여 연기가 침입하게 된다. 이러한 현상은 이론적으로는 피난을 위해 문을 열고, 그 문이 자동적으로 닫히는 짧은 시간내에만 발생되며, 이 때 침입한 연기는 외기의 공급에 의하여 희석되면서 시간이 경과할수록 농도가 낮아진다. 알려진 바에 의하면 일반화재의 경우, 희석환기에 의한 制煙은 연기의 농도를 최소한 1% 이하로 유지하여야 하며, 이 경우를 해석하기 위하여 피난구역 내에서 연기가 균일하게 분포되어 있다고 가정하면 다음 식이 성립된다.

$$\frac{C}{C_0} = e^{-at}$$

C_0 : 초기의 연기농도

C : t 시간 후의 연기농도

a : 배연속도, 즉 환기횟수

t : 문이 폐쇄된 후로부터의 시간

e : 자연대수의 밑 (2.718...)

위 식을 변형하면 환기횟수는,

$$a = \frac{1}{t} \cdot \ln \left(\frac{C_0}{C} \right) \dots \dots (3.3 \text{식}) \text{으로 된다.}$$

실제로 어떤 구역內에서의 연기분포는 균일하지 않으며, 부력으로 인해 천정부근에 연기가 집중하게 되므로, 배연구는 천정 가까이, 급기구는 바닥면 가까이 설치하고 인접하지 않도록 주의하여야 한다. 이렇게 하면 위 식에서 계산된 시간보다 훨씬 짧은 시간내에 연기를 배출시킬 수 있을 것이다. 그러나 환기방식을 취하더라도 배기량보다는 많은 양의 급기를 행함으로써 궁극적으로는 피난구역을 가압하여야만 효과적인 制煙이 가능하며, 연구결과에 의하면 급기만에 의한 加壓으로도 이러한 일시적인 연기침입에 대해서는 충분히 안전하다는 견해가 지배적이다. 따라서 이러한 환기와 동시에 가압을 행하는 방식이 制煙效果의 측면에서는 약간 우수하더라도, 설비비가 높아지고 많은 건축공간이 소요되는 불리함 때문에 자주 채택되지 않고 있는 경향이다.

3.2 화재구역 (Fire Area)

화재구역에서의 制煙設備을 적용하는 데는 두 가지 상반된 개념이 있다. 첫번째는 화재시 생성되는 연기의 급격한 팽창과 가압구역으로 부터의 누설공기에 의한 화재구역內的 과도한 압력형성을 해소시켜 연기의 전파를 방지하는 방식(排煙方式)이고, 두번째는 화재구역內의 人命의 대피를 위한 대피로와 진화활동을 위한 소방대의 진입로를 형성시키기 위하여 동일한 풍량의 급기와 배기를 행하는 방식(給排氣方式)이다. 그러나 後者의 경우에 있어서는 피난구역과 화재구역간의 연기의 전파를 억제하기 위한 압력차나 풍속을 유지하기 어렵고, 희석환기에 의해 화재시 발생되는 연기의 농도를 감소시키기 위해서는 엄청난 량의 공기가 필요하게 되므로 바람직한 방법이 못된다고 생각한다. 따라서 여기서는 전자의 경우와 같이 화재구역內的 연기농도는 제어하지 않고, 화재발견 즉시 화재구역內的 거주인원을 안전한 장소로 대피시키고, 비화재구역의 일부 또는 전부와 피난로를 가압하면서 화재구역에 대해 배연만을 행하는 시스템에 대해 언급하기로 한다. 이러한 화재구역에서의 배연을 행하는 방법으로는 다음에 설명하는 세가지가 주로 사용된다.

1) 외벽배연구 (Exterior Wall Vents)

화재시 창문이나 외벽에 설치된 개구부를 자동 또는 수동으로 개방하여 배연을 행하는 방법으로 바람에 의한 영향을 최소화 하기 위해 배연구의 개구면적은 外壁에 걸쳐 고르게 분포시켜야 한다. 또한 그림 3에서와 같이 상부층으로의 화재전파나 연기상승을 조장하지 않도록 충분히 고려하여야 한다.

외벽배연구(外壁排煙口)의 크기는, 층별 방화구획을 기준하고, 비화재층 전체 또는 화재인접층을 가압하는 경우(그림 5. 참조), 다음과 같은 관계가 있다.

$$A_v \cdot \sqrt{P_F - P_0} = A_e \cdot \sqrt{P_B - P_F}$$

A_v : 외벽배연구의 개구면적(m^2)

A_e : 화재층의 유효누설면적(m^2)

P_0, P_B, P_F : 외기, 화재인접층, 화재층의 실내압력(Pa)

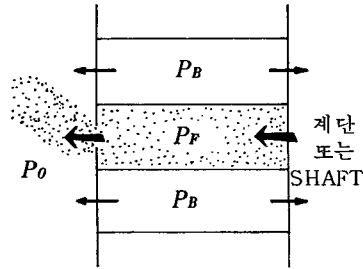


그림 5. 외벽배연구에서의 공기흐름

위식을 변형하면,

$$\frac{\Delta P_{BF}}{\Delta P_{B0}} = \frac{(A_v/A_e)^2}{1 + (A_v/A_e)^2} \dots\dots (3.4 \text{ 식}) \text{ 이}$$

된다.

ΔP_{BF} : 화재인접층과 화재층간의 압력차 ($P_B - P_F$)

ΔP_{B0} : 화재인접층과 외기와의 압력차 ($P_B - P_0$)

(3.4 식)을 graph로 나타내면 그림 6과 같다.

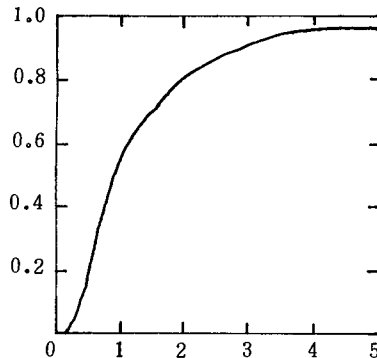


그림 6. 외벽배연구의 크기에 따른 압력차의 변화

여기서, A_e 와 ΔP_{B0} 가 일정할 때 A_v (외벽배연구의 면적)가 커짐에 따라 ΔP_{BF} (화재

인접층과 화재층간의 압력차)가 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 외벽배연구의 면적이 제연 성능에 중요한 요인임을 나타내 주고 있는데, A_v/A_e 의 값이 3이상이 되면 $\Delta P_{BF}/\Delta P_{Bo}$ 값의 증가추세가 급격히 둔화되는 것으로 보아 경제적인 외벽배연구의 선정을 위해서는 A_v/A_e 의 값을 3이하로 하는 것이 타당하리라 본다.

2) 배연샤프트(Smoke Shaft)를 이용하는 방법

외부를 통한 화재전파의 위험이 있는 외벽배연구 대신 각층의 천정부근에 배연구를 설치, 배연샤프트로 연결하여 옥상등의 건물외부로 연기를 배출시키는 방법이다. 각층에 설치하는 배연구에는 常時폐쇄(Normally Closed)댐퍼를 설치하여 화재시 화재구역의 댐퍼만을 개방토록 하고, 옥상등에 설치하는 배연샤프트의 연기배출구는 옥상피난계단출구와 가능한 한 격리시켜 피난·소화활동에 지장을 초래하지 않도록 고려한다.

3) 기계배연방식(機械排煙方式)

외벽배연구나 배연샤프트를 이용하는 방법은 독자적으로 배연을 행할 수 있는 적극적인 수단이 아니므로, 비화재구역, 피난로등의 가압시스템과 함께 사용되어야 유효하며, 이들 방법은 굴뚝효과, 풍압효과등 외부적 요인에 의해 성능이 크게 달라진다. 송풍기등의 機械力을 이용한 배연설비는 독자적으로도 배연을 행할 수 있는 적극적인 수단이지만, 일반적으로 비화재구역, 피난로등의 가압시스템과 함께 사용하여야 그 효과가 확실하다. 기계배연방식에서의 배연구의 위치는 피난·소화활동을 고려하여 피난출구에서 가능한 한 먼 곳에 설치하는 것이 좋고, 천정부근에 위치하여야 한다. 배연시스템은 별도의 독립계통으로 하거나 공조·환기설비를 이용하여도 무방하다. 그러나 고온의 배연가스를 취급하게 되므로 덕트, 송풍기등이 열에 충분히 견딜수 있도록 고려하여야 한다. 이러한 방법으로는 耐熱 Fan을 이용하거나 가능한 한 배연구

획을 크게 하여 송풍기 단위용량을 증가시킴으로써 연기를 희석, 냉각시켜 송풍기를 안전하게 운전하는 방법이 있다. 스프링클러 등에 의해 냉각된 연기(Cool Smoke)의 경우에는 덕트나 Fan의 운전에 별로 문제가 없으나, 하나의 배연구획이 아주 작아서 송풍기 단위용량이 충분하지 못한 경우에는 문제가 생길 수 있으므로 주의하여야 한다.

3.3 비화재구역(Non-Fire Area)

화재시 화재구역으로부터 비화재구역으로 연기가 전파되는 것을 방지하기 위한 방법으로는 비화재구역을 가압하는 것이 가장 효과적이다. 비화재구역을 가압하는 방법은 그림 7 A와 같이 비화재구역전체를 가압하는 방식과 그림 7 B와 같이 화재구역에 인접한 비화재구역만 가압하는 방식(Pressure Sandwich 방식이라고 한다)이 있는데, 後者의 방식에서는 배연샤프트의 기밀상태가 좋지 않을 경우 가압하지 않은 비화재구역에서 연기가 누출될 가능성이 있다. 前者의 경우에는 이러한 위험이 거의 없다. 비화재구역의 가압은 화재구역의 배연과 동시에 사용하여야만 충분한 효과를 유지하며, 비화재구역의 가압용 송풍기는 공조환기설비를 이용하는 것이 通例이다. 또한 가압용 송풍기의 공가흡입구의 위치는 배출된 연기를 흡입하지 않도록 주의하여야 한다.

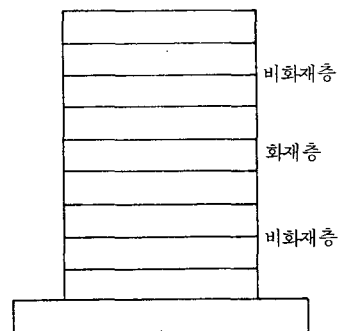


그림 7 A. 전층가압방식

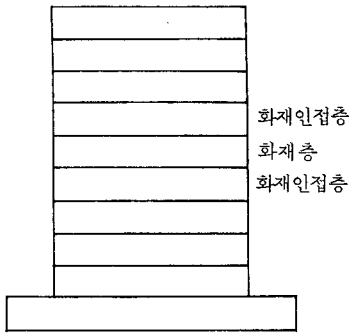


그림 7 B. 화재인접층 가압방식
(Pressure Sandwich)

4. 설계요소의 고찰

制煙設備의 설계에 있어서 중요한 지표가 되는 설계요소로는, i) 외부기상조건, ii) 압력차, iii) 풍속, iv) 유효누설면적, v) 개방문의數, 등이 있다.

4.1 외부기상조건 (Weather Condition)

중요한 氣象조건으로는 온도와 바람을 들 수 있는데, 制煙設備시스템에서의 설계외기온도는 공조설비에서의 설계온도와 그 개념을 달리한다. 공조설비에서의 설계온도는 벽체등 구조에 의한 시간지연이 발생하므로 그리 엄격하지 않으나, 制煙設備시스템의 경우, 설계온도보다 낮은 외기온도에서 화재가 발생하면 굴뚝효과에 의한 영향으로 심각한 문제가 야기될 수도 있으므로, 외기설계온도는 極值를 채택하는 것이 타당하다. 바람(풍향, 풍속 등)에 의한 영향은 制煙設備의 성능에 크게 영향을 미치는 要素임에도 불구하고 아직은 定型化된 分析技法이 없다. 다만 설계자의 경험과 기술적 판단에 의해 풍압효과를 최소한으로 억제할 수 있도록 설계방향을 설정하고, 모델실험에 의한 조사해석으로 문제점을 해결하고 있는 실정이다.

4.2 압력차 (Pressure Differential)

단순히 煙氣의 침입을 방지하기 위해 필요한 압력차의 設定은 크게 할수록 유리하나, 너무 큰 압력차가 발생하면 문에 걸리는 압력(즉, 문을 여는데 소요되는 힘)이 과대하게 되어 피난이 불가능하므로 특히 유의하여야 한다. 허용가능한 최대의 압력차를 설정하기 위해서는 거주인원이 문을 열 수 있는 힘의 크기를 파악해야 하는데, 이는 각 행위자(성인, 노인, 부녀, 어린이, 장애자등)의 특성이 서로 다르고 “화재”라는 특수상황에서의 심리적 요인에 의한 신체능력의 변화등을 예측하기 어렵기 때문에 결코 쉬운일이 아니다. NFPA의 Life Safety Code에서는 “문을 여는 힘”을 50 lb(222N)로 제한하고 있고, 301b(133N)를 권장하고 있다. 문을 여는데 필요한 힘 F는,

$$F = Fdc + \frac{Kd \cdot W \cdot A \cdot \Delta P}{2(W-d)} \dots\dots (4.1 \text{식})$$

으로 표시된다.

F : 문을 여는데 필요한 힘 (N)

Fdc : 도어체크(자동폐쇄장치)의 반력을 극복하기 위한 힘 (N)

W : 문의 폭 (m)

A : 문의 면적 (m²)

ΔP : 압력차 (Pa)

d : 도어 핸들에서 힌지 까지의 수평거리 (m)

Kd : 상수 (1.0)

일반적으로 Fdc는 3 lb (13N)에서 최대 20 lb (90N) 정도의 값을 갖는다. 예를 들어 F = 40 lb (178N), Fdc = 11 lb (49N), 문의 크기를 0.9 m × 2.1 m로 가정하여 試算해 보면 ΔP는 120 Pa로 된다. 허용가능한 최대압력차를 선정하는 데는 피난에 걸리는 시간, 화재의 전파속도, 건물의 형상, 소방설비의 종류 등을 고려하여야 하나, 이에 필요한 分析技法은 定型化되어 있지 않으므로 設計者의 경험과 기술적

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_T = C \cdot Ae \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$

$$= C (A_1 + A_2 + A_3) \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$

가 성립되고,

따라서, $Ae = \sum_{i=1}^n A_i \dots\dots (4.2 \text{ 식})$ 으로 구할

수 있다.

2) 직렬상태로 배열된 경우

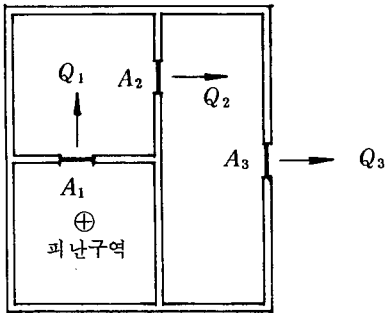


그림 9. 직렬상태의 배열

$$\Delta P_T = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$ 가 성립된다.

$$Q = C \cdot Ae \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P_T}{\rho}} \text{ 에서}$$

$$\Delta P_T = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{CAe} \right)^2$$

$$\Delta P_T = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{C} \right)^2 \left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \frac{1}{A_3^2} \right) \text{ 이므로}$$

$$Q = C \sqrt{\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \frac{1}{A_3^2}} \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P_T}{\rho}} \text{ 가}$$

되고

따라서 $Ae = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{A_i^2} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots (4.3 \text{ 식})$

으로 구할 수 있다.

3) 직렬과 병렬의 혼합배열인 경우

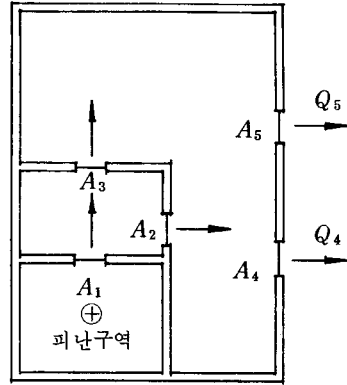


그림 10. 직렬과 병렬의 혼합배열

$$A_{23}e = A_2 + A_3$$

$A_{45}e = A_4 + A_5$ 가 성립된다 (병렬상태) 또,

$$Ae = \left[\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_{23}e^2} + \frac{1}{A_{45}e^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \text{ 이므로}$$

(직렬상태) 이므로,

$$Ae = \left[\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{(A_2 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_4 + A_5)^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

이 된다.

4.5 개방문(開放門)의 數

가압구역에서 굵기가 행해지고 있는 동안에 동시에 열리는 문의 갯수는 제연시스템의 성능에 거의 절대적 영향을 미치는 중요한 요소로서, 몇 개의 문이 동시에 열리느냐를 결정하는 요인은 건물거주인원의 수, 건물의 平常時사용 패턴, 화재시 피난계획등이 있다. 인구밀도가 높고 고층인 건물에서는 거의 모든 문이 열릴 가능성이 있으므로 단계별 피난계획 또는 일시피난의 개념을 설정하여 비상시에 피난관리를 시행할 필요가 있다. 대부분의 가압 계단에는 부속전실이 있어서 단계별 피난을 위한 대기장소로 이용

판단에 의존하고 있다. 일반화재의 경우, 화재 구역과 화재인접층, 화재구역과 피난구역간의 압력차는 20~25 Pa 이상으로 하고, 화재구역으로부터 멀리 떨어진 구역이나 냉각된 연기 (Cool Smoke)를 대상으로 할 때는 5~10 Pa 이상으로 선정하는 것이 通例이다. 英國의 BS Code에서는 압력차를 최대 60 Pa 을 넘지 않도록 제한하고 있으며, 50 Pa 를 기준압력차로 규정하고 있다.

4.3 풍속 (Air Velocity)

연기의 逆流방지를 위한 최소풍속의 선정은 定說이 없으나, 前述한 Thomas의 실험식을 근거로 한 (3.2식)을 적용해도 좋다. 그러나 스프링클러설비 등에 의해 냉각된 연기 (Cool Smoke)의 경우에는 적용하기에 부적합하며, 이 식에 의해 계산된 필요풍속이 1.5 m/sec를 초과하는 경우에는 풍속에 의해 연기를 제어하는 방법이 비경제적이라 판단하여도 좋을 것이다. 英國의 BS Code에 의하면 개방문에서의 풍속조건을 0.5~0.75 m/sec 이상으로 유지하도록 하고 있다. 냉각연기 (Cool Smoke)와 같이 上流와 下流의 온도차가 작은 경우에는 Shaw와 Whyte의 실험에 의하면 최소 0.25 m/sec 이상의 풍속이 필요하며, 일반적으로 채택되고 있는 실제풍속의 범위는 0.25~1.25 m/sec 정도이다.

4.4 유효누설면적 (Effective Leakage Areas)

벽체, 바닥, 창문, 문등의 틈새면적은 건물의 施工精度와 構造, 經年에 따른 老朽度, 유지관리 상태 등에 따라 크게 달라진다. 일반건물의 경우 문의 틈새간격은 3~20mm 정도의 범위이고, 엘리베이터 문의 누설면적은 1개소당 0.05~0.065 m² 정도로 계산한다. 또 벽체, 바닥에서의 누설면적은 다음의 표를 참고로 하거나,

표. 일반건물의 벽체, 바닥에서의 누설면적

누 설 요 소	기밀 상태	누설면적비 (누설면적 / 전면적)
건물의 외벽 (건물틈새, 창문등의 틈새면적 포함)	양 호	0.70×10^{-4}
	보 통	0.21×10^{-3}
	불 량	0.42×10^{-3}
	아주불량	0.13×10^{-2}
계단실의 벽체 (창문, 문등의 틈새 면적은 포함하지 않음)	양 호	0.14×10^{-4}
	보 통	0.11×10^{-3}
	불 량	0.35×10^{-3}
엘리베이터 샤프트의 벽체 (엘리베이터문의 틈새면적은 포함하지 않음)	양 호	0.18×10^{-3}
	보 통	0.84×10^{-3}
	불 량	0.18×10^{-2}
바닥 (관통부등의 틈새 면적 포함)	보 통	0.52×10^{-4}

ASHRAE Handbook, 1981 Chapter 22 를 참조하여도 좋다.

이러한 누설면적들의 배열 상태는 직렬과 병렬의 두가지 상태로 구성되며 각각의 상태에 따라 다음과 같이 계산하여 전체의 유효누설면적을 구한다.

1) 병렬상태로 배열된 경우

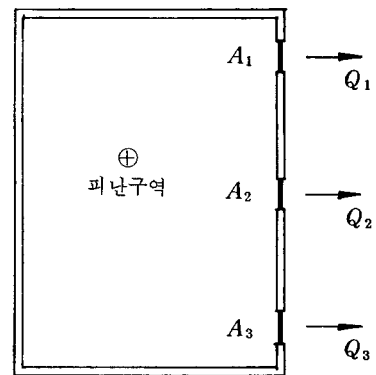


그림 8. 병렬상태의 배열

되기도 하고, 거실과 계단실 사이의 개방문의 조건을 완화시켜주는 역할을 하기도 한다. 이때의 전실은 반드시 가압해야 할 필요는 없으나 계단실과 같은 수준 또는 계단실 보다 약간 낮은 정도(계단실과의 압력차를 5 Pa 이내)로 가압하는 것이 바람직하다.

5. 公조환기설비의 制煙시스템에의 이용

HVAC 시스템을 제연설비로 이용하는 경우의 전형적인 방법으로는, i) 화재구역에서는 급기 i) 화재구역에서는 급기송풍기의 운전을 중지하고 환기송풍기에 의해 100% 배기를 행한다. 환기송풍기가 없는 시스템에서는 외벽배연구나 샤프트도 이용 가능하다.

ii) 비화재구역에서는 화재인접구역 전체를 가압하기 위해 배기를 중지하고 100% 외기를 도입, 급기만을 행한다.

iii) i), ii)와 함께 피난로의 보호를 위해 급기가 압한다.

등을 들 수 있다.

화재구역의 경계면에서의 압력차는 건물구조의 누설특성과 각 구역에서의 급·배기풍량에 따라 크게 달라지는데, 지금까지의 설계관례는 制煙에 필요한 급·배기풍량을 HVAC 시스템의 용량에 맞추어 왔으며, 이 때의 환기횟수는 대개 4~6회/시간 정도로 된다. Tamura의 실험에 의하면 모든 문이 닫혀 있는 경우에는 이 정도의 풍량으로도 제연에 필요한 충분한 압력이 유지되지만, 계단실의 문이 열리게 되면 압력차는 급격히 떨어져 2.5Pa 내외로 되는데, 이러한 낮은 압력차는 스프링클러등에 의해 냉각된 연기나 화재초기의 에너지발산속도가 낮은 연기등은 제어 가능하나, 고온의 부력이 강한 연기는 제어할 수 없게 된다. 따라서 이러한 뜨겁고 부력이 강한 연기를 제어하기 위해서는 제연구역을 화재구역보다 크게 설정하는 방법도 고려할 수 있다. 예를 들어 층별 방화구획되어 있는 건물

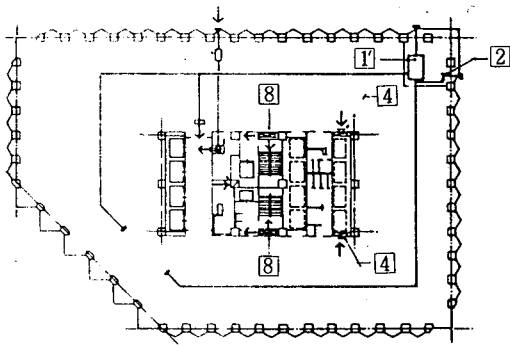
에 있어서 하나의 制煙區劃을 화재층과 그 인접층으로 확대 설정한다면 화재층으로 부터 인접층으로 연기가 전파되는 동안에 열전달, 회석등에 의해 연기의 온도는 상당히 떨어지고 훨씬 제어하기 쉬운 상태로 될 것이다. 물론 이러한 방식을 채택하는 경우 화재발생을 검출하는 즉시 화재층과 인접층의 거주인원을 신속히 대피시켜야 하는 것은 당연한 일이다.

6. 制煙設備의 實例

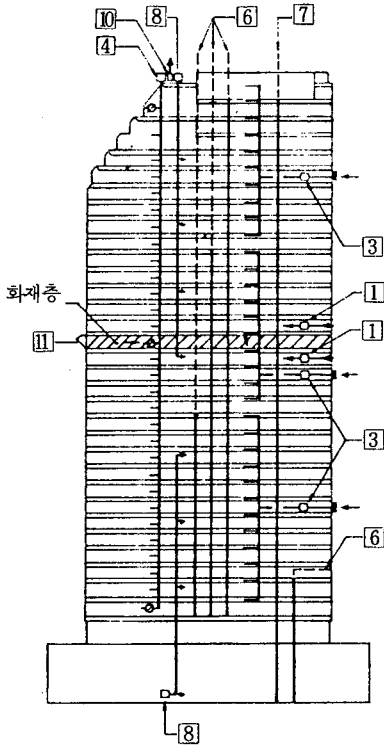
앞에서 언급한 여러가지 制煙方式을 적용함에 있어서는 각 방식 상호간의 영향을 주의깊게 고려하여야 하며, 설계조건과 完工 후의 조건이 달라지는 점을 충분히 감안하여 필요한 적정여유치를 가산하여야 한다. 또한 시운전 및 조정을 행하여 시스템으로서의 성능이 유지되도록 하는 것이 중요하며, 필요한 경우 성능확인 시험을 행한다. 성능확인시험은 보통 2단계로 나누어지는데, 1단계는 각 구성기기의 이상 유무를 확인하기 위한 기능 작동시험이고 2단계는 시스템으로서의 성능을 확인하는 운전시험이다. 운전시험의 방법에는 여러가지가 있는데, 최소한의 필수시험으로 시행하여야 하는 압력 및 풍속 시험과 필요시 선택적으로 실시하는 實火(Real fire) 시험, Chemical smoke 시험, Tracer gas 시험등을 들 수 있다. 또한 제연설비의 설계시 신뢰성이 높은 자동제어시스템을 채택하는 것이 극히 중요하므로 유의하여야 할 것이다.

다음에 제연설비의 實例로서 국내 L빌딩의 경우를 들어 설명한다. (그림 11 A, 그림 11B 참조)

- ① 기준층용 공조기
- ② 공조용 배기 FAN
- ③ ELEV. 로비 가압시스템
- ④ 거실배연시스템
- ⑤ 전기실 배연시스템
- ⑥ ELEV. 샤프트 배연구



A. 기준층 평면도



B. 제연설비 계통도

그림 11. L빌딩의 제연설비 방식

- ⑦ 비상 ELEV. 샤프트배연구
- ⑧ 피난로 가압시스템
- ⑨ VAV BOX
- ⑩ 계단실 상부배기시스템
- ⑪ 수동 외벽개구부

제연설비의 운전제어순서는 다음과 같다.

- 1) 화재층의 공조기 급기송풍기 (①) 운전중지
- 2) 화재층 및 화재인접층의 배기 Fan (②) 운전중지
- 3) 화재인접층의 공조기 급기송풍기 (①) 100% 외기로 가압운전
- 4) 공조기의 급기 일부로 모든 비화재층의常用엘리베이터 로비를 가압 (⑨)
- 5) 화재인접층의 모든 VAV Box의 공조용 자동제어를 폐쇄시켜, 실내온도와 관계없이 VAV Box의 댐퍼를 완전개방상태로 한다.
- 6) 화재층의 常用엘리베이터 홀을 가압 (③)
- 7) 화재층의 거실배연 시스템 (④) 운전, 연기배출
- 8) 피난로 가압시스템 (⑧) 작동, 계단실, 계단전실, 비상엘리베이터 홀을 가압
- 9) 화재층, 화재인접층을 제외한 기타지역의 공조기는 정상운전
- 10) 수동식 외벽개구부 개방가능 (⑪)
- 11) 계단실의 압력이 일정이상인 경우 계단실 상부의 배기시스템 (⑩) 작동으로 계단실의 과도한 압력형성을 해소
- 12) 엘리베이터 샤프트內에서 연기가 감지되는 경우, 엘리베이터 샤프트의 배연구를 개방 (⑥, ⑦)
- 13) 전기실에서 연기가 감지되는 경우, 전기실 배연시스템 (⑤) 을 작동시켜 연기를 배출

結 語

이상, 前述한 바와 같이 制煙設備의 適用概念과 몇가지 중요한 設計要素에 대하여 살펴 보았다. 그러나 실제로 制煙設備를 設計하기 위해서는 여러가지의 복잡한 要因을 해석해야 하며 대개의 경우, 이러한 계산은 Computer에 의존하게 된다. 또, 先進各國의 制煙設備에 관한 法

規나 基準을 살펴보면 그 根幹은 비슷하나 적용 수치에 있어 약간의 차이점이 있다. 그렇지만 어느 정도의 경험과 技術的 判斷에 의존하는 유연성을 부여하고 있으므로 큰 문제로는 되지 않는다.

제연설비의 實現에 있어서 무엇보다도 중요한 사항은 건축계획 당시에서 부터 防災對策으로서의 制煙設備의 역할을 충분히 인식하여 設計, 施工, 製作, 管理 및 運用에 이르기까지 一貫된 체계를 유지하는 것이다. 이에 대해서는 관계 技術人, 특히 제연설비의 成敗를 左右하는 결정적 열쇠를 가지고 있는 건축관계자들의 각성과 노력이 촉구되어야 할 것이다.

〈 參考文獻 〉

- ① Design of Smoke Control Systems for Buildings, 1983 ASHRAE
- ② BS5588 : Part 4 : 1978, Smoke Control in Protected Escape Routes using Pressurization, BSI
- ③ M. David Egan, Concepts in Building Firesafety, 1978
- ④ John H. Klote, Stairwell Pressurization, ASHRAE Trans. Vol. 86 Part I pp604 ~ 623, 1980
- ⑤ 김상욱, 배연설비 세미나자료, 공기조화 냉동공학회
- ⑥ 防災ミシステム研究會編, 防排煙設備の實務, 1977 オーム社