

# 안전한 피난로 확보를 위한 초고층건물의 연기제어

여 용 주

(주)유탐엔지니어링

(yeoyong@kornet.net)

## 제1장 초고층건물이 왜 화재 시 위험할 수밖에 없는가 ?

초고층건물의 가장 큰 특징은 결국 매우 높다는 것이다. 매우 당연한 의미이지만, 이러한 특징은 화재안전 측면에서 매우 까다롭고 난해한 대상이다. 가장 큰 문제점은 피난시간의 장시간 소요에 있다. 이러한 특성은 초기발화로부터 화재가 완전히 성장한 상태에서도 계속해서 피난이 이루어진다는 것이다. 이것은 중기화재이후에도 건물 내 거주자가 체류하고 있다는 전제를 가져야 하며, 장시간의 피난시간 동안 안전한 피난경로를 확보하여야 할 과제에 직면하게 된다.

안전한 피난로 확보를 위해서는 건물 구조체의 내화성능도 중요하지만, 더 중요한 것은 장시간 중기화재 이후에서도 피난로의 연기유입을 막을 수 있는 연기제어시스템의 성능이 초고층건물에서 인명의 안전을 좌우하는 핵심요소가 될 것이다.

## 제2장 건물 내 연기유동을 일으키는 힘

화재가 발생할 경우 연기의 유동을 일으키는 최초의 압력차는 화재실의 부력에 의하여 발생하고, 화재실로부터 유출된 연기는, 계단실이나 설비샤프트 등의 수직통로를 통하여 상층부로 이동하게 된다. 수직으로 상승하는 연기의 속도는 수평이동속도에 비하여 2~3배이상 빠르게 이동한다. 일단 수직통로에 연기가 유입되면, 수직통로내부의 온도가 상승하면

서 건물의 다른 부분과 온도차가 형성되며, 이렇게 형성된 온도차는 연돌효과를 발생시킨다. 즉, 화재로부터 샤프트내부로 유입된 고온의 연기는 연돌효과를 발생시키고 매우 강한 상승력으로 상층부를 오염시키게 된다. 연돌효과는 온도차가 클수록 그리고 높이가 높을수록 커지기 때문에, 특히 초고층빌딩의 경우에는 매우 치명적인 결과를 초래할 수 있다.

연돌효과를 간단하게 설명하기위해 그림 1과 같이 건물내부의 온도가 25°C, 외기의 온도가 -10°C 이고 건물의 아래쪽에만 작은 개구부가 존재하는 경우를 예를 들어보자. 대기압은 유체정역학에 의하여 높이가 높아질수록 압력은 감소한다. 개구부가 건물의 최하층에 하나만 존재하므로, 개구부 양단에는 기류의 흐름이 없다. 따라서 개구부의 위치에서는 건물내부와 외기의 압력이 같게 되고, 이를 기점으로 높이에 따른 절대압력은 그림 1의 오른쪽 그래프와 같이 변한다. 압력의 감소율은 공기의 밀도에 비례하므로 높이가 높아질수록 건물내부와 외기의 압력차는 커진다. 그림 1에서 30 m높이에서 건물내부와 외기의 압력차 계산은 다음과 같이 할 수 있다.

$$\text{압력차} = \text{건물내부의 절대압력}(P - \rho_1 gh) - \text{외기의 절대압력}(P - \rho_0 gh)$$

$$\text{압력차} = (\rho_1 - \rho_0)gh = (1.18 - 1.34)9.8 \times 30 = -47 \text{ Pa}$$

정리하면, 연돌효과에 의해 발생하는 압력차는 다음과 같이 계산할 수 있다.

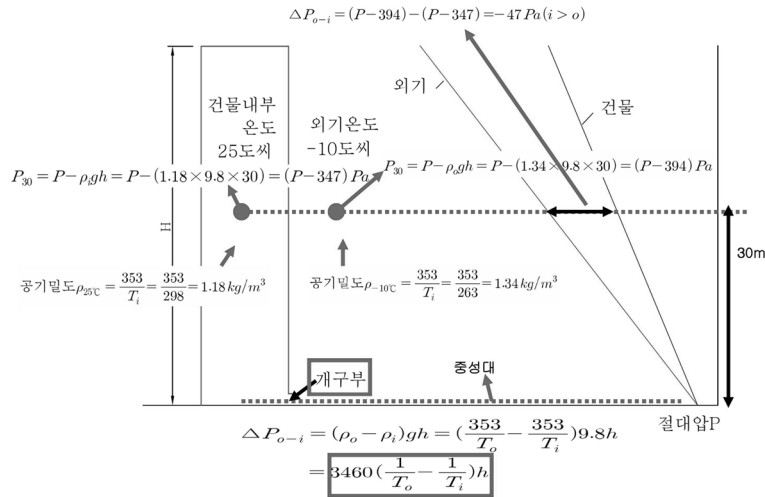


그림 1. 건물내외부의 온도차와 최하층에 하나의 개구부만 존재할 경우의 압력분포

$$\Delta P_h = 3460 \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) h \quad (\text{식 1})$$

여기서,  $\Delta P_h$  = 중성대로부터 높이  $h$ 에서의 압력차,  $Pa$   
 $T_o$  = 외기의 온도,  $^{\circ}K$   
 $T_i$  = 건물내부의 온도,  $^{\circ}K$   
 $h$  = 중성대로부터의 높이,  $m$

### 제3장 연돌효과로 인한 연기의 유동

연돌효과는 동절기에만 발생하는 것이 아니다. 건물내외의 온도가 같아 연돌효과의 영향이 없는 5층 규모의 작은 건물을 대상으로 시뮬레이션을 수행해 보았다. 결과는 그림 2와 같이 화재로부터 발생하고 온열기류가 부력에 의해 발화실 외부로 유출하고 수직샤프트로 유입된다. 이 때 수직샤프트는 고온열기류에 의하여 온도가 상승하게 되는데, 결과적으로 수직샤프트와 외기사이의 온도차를 형성시켜 연돌효과를 발생시키게 된다. 이렇게 형성된 연돌효과는 더욱 강하게 수직샤프트로 다량의 연기를 유입시키게 된다. 즉, 화재 자체의 열기류에 의해 연돌효과가 발생하고, 건물의 높이가 높을수록 연돌효과는 더욱 커지기 때문에 초고층건물이 더 위험한 것이다.

화재의 위치는 연돌효과의 강도와 관련이 있다. 저층부에서 화재가 발생하였을 경우에는 수직샤프트

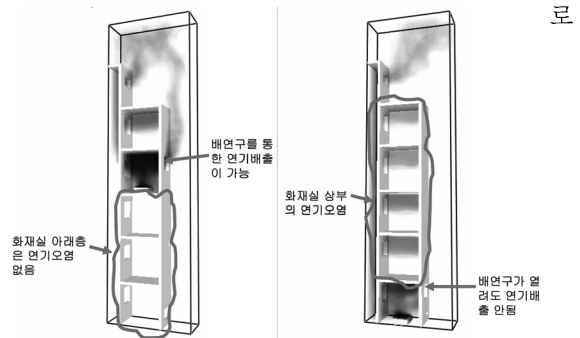


그림 2. 화재위치에 따른 건물내 연기의 유동 비교

의 연기유입을 더욱 가속화 시킨다. 그림 2의 오른쪽 건물의 예가 그렇다. 1층에서 화재가 발생하였고 이 때 연기의 배출을 위하여 외벽 배연구를 개방하자 연기는 더욱 급격하게 수직샤프트로 강하게 유입된다. 저층부에서는 배연구의 개방이 연돌효과를 더욱 강하게 발생시킨다. 그림2의 왼쪽 건물과 같이 상층부에서 화재가 발생한 경우에는 수직샤프트로의 연기유입은 매우 약하고, 열린 배연구를 통해서도 일부 연기가 유출되는 것을 알 수 있다.

그림 3은 그림 2의 결과를 건물내 압력차 나타낸 것이다. 화재의 위치가 상층부인 왼쪽의 경우에는 중성대를 기준으로 상부와 하부의 최대 압력차가

8.5~6.5 Pa정도로 분포하고 있다. 오른쪽의 경우에는 25.5~29.5 Pa로 압력차가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 건물의 아래층에서 화재가 발생할 경우 더욱 위험한 결과를 초래한다는 것을 의미한다.

이렇게 연돌효과는 화재에 의해서도 발생할 수 있으며, 화재위치가 낮을 수록, 건물의 높이가 높을 수록 커지게 된다. 그리고 저층부화재에서는 화재실과 외기사이의 배연구의 개방이 연돌효과를 더욱 증대시킨다. 초고층건물에서 저층부에서 화재가 발생한다면 가장 최악의 시나리오가 될 것이다. 이와 관련하여 건물의 모든 층에 설치하도록 규정하고 있는 배연창에 대해 보다 신중한 검토가 필요하다.

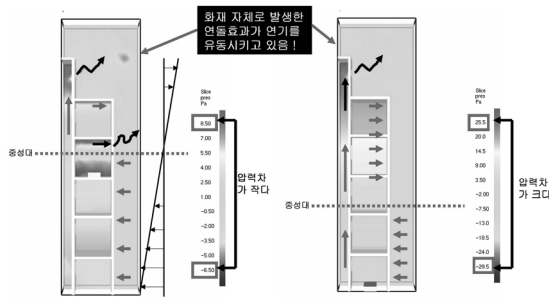


그림 3. 화재위치에 따른 건물내 압력분포 비교

#### 제4장 초고층건물에서의 예상되는 연기제어의 문제점

지금까지 논의한 바와 같이, 초고층건물에서는 연돌효과의 영향이 크기 때문에 계단실로의 연기유입이 빨라지고, 유입된 연기는 피난을 방해함과 동시에 건물전체에 연기를 전파시킨다. 따라서 연기제어의 주안점은 피난계단실로의 연기유입을 막는 데에 있다. 이와 관련하여 국내 소방법에서는 특별피난계단실, 특별피난계단부속실 그리고 비상용승강기 승강장은 급기가압제연설비를 설치하도록 의무화하고 있다.

급기가압제연설비란 그림 4와 같이 안전공간내부의 압력을 높임으로서 연기의 유입을 차단하는 설비를 의미한다. 이는 특별피난계단실과 부속실에 강제급기를 하여 화재실보다 일정압력이상 높게 유지

하는 기법이다. 실험에 의하면 적절한 연기의 유입을 막을 수 있는 최소압력차는 5 Pa정도로 알려져 있다. 영국의 기준은, 화재실의 부력과 연돌효과 그리고 바람 등의 영향에 의한 역압력차를 극복하기 위하여 평상시 역압력차가 작용하지 않는 상태에서 최소 50 Pa(10%) 정도를 적정수준으로 규정하고 있다. 평상시 50 Pa을 유지한다면, 연돌효과와 바람 그리고 화재실의 부력이 작용하여도 50 Pa을 초과하지 않으므로, 연기의 유입을 막을 수 있다는 의미이다. 미국의 기준은 연돌효과와 바람의 영향에 의해 예상되는 압력을 설계자가 판단하도록 하고 있으며, 단지 화재실의 부력만을 이길 수 있는 압력차를 스프링클러를 설치하였을 경우에는 12.5 Pa, 미설치 경우에는 25 Pa을 요구하고 있다. 예를 들어 스프링클러가 건물에 설치되어 있다면, 연돌효과와 바람 등의 영향을 받는 상태에서 제연구역의 압력이 화재실보다 최소 12.5 Pa이상 높아야 한다는 의미이다.

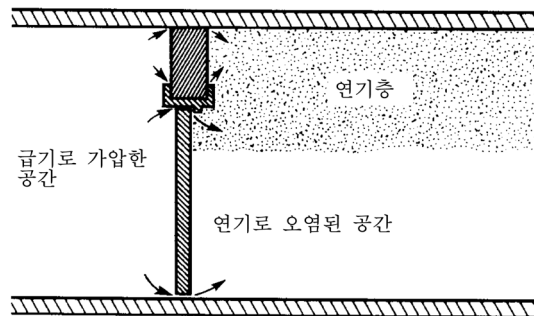


그림 4. 압력차를 이용한 방연기법

압력차가 클수록 연기의 유입은 어려워지기 때문에 최대한 압력차를 크게 하는 것이 좋겠으나, 지나치게 압력차를 크게 할 경우에는 제연구역의 출입구를 개방하는 것이 어려워진다. 이는 오히려 피난에 장애를 초래하는 또 다른 문제가 되므로 최대압력차를 제한하고 있다. 최대압력차의 제한은 피난구를 개방하는 데 필요한 힘을 기준으로 국가별로 100~130 N 정도로 규정하고 있으며, 국내의 경우에는 110 N을 최대압력차로 규정하고 있다. 피난구에 미치는 힘이 110 N 이하가 되어야 대부분의 사람들이 무리 없이 문을 열수 있다는 최저기준을 의미한다. 압력차

가 문에 미치는 힘을 계산하기 위하여 다음과 같은 식을 이용한다.

$$F = F_{dc} + \frac{WA\Delta p}{2(W-d)} \quad (\text{식2})$$

여기서,  $F$ =문을 여는데 필요한 힘, N

$F_{dc}$ =도어클로저의

저항, N

$W$ =문의 폭, m

$A$ =문의 면적,  $m^2$

$\Delta p$ =차압, Pa

$d$ =문의 끝부분에서 문의 손잡이까지의 거리, m

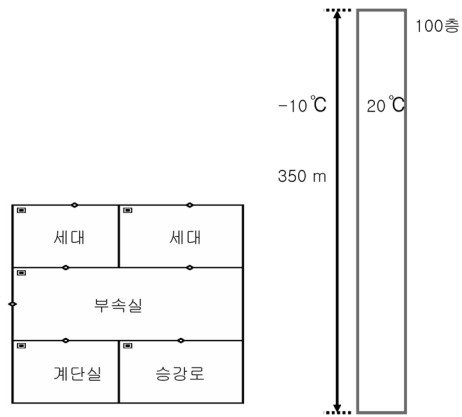
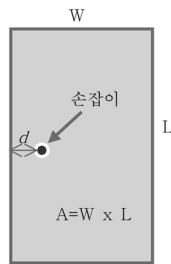


그림 5. 연돌효과 계산을 위한 350 m 높이의 초고층건물의 예

이러한 압력차를 이용하는 연기제거기법에는 연돌 효과의 영향이 매우 많은 영향을 미친다. 우선 초고층건물에서 순수한 연돌효과가 얼마나 발생가능한가를 예를 들어 보자. 그림 5와 같이 350 m 높이의 100층 건물에서 옥내온도가 20°C, 부속실, 계단실, 승강로 온도는 10°C, 외기온도는 -10°C인 겨울철의 연돌효과를 컴퓨터 네트워크모델인 CONTAMW를 이용하여 분석해보았다. 건물의 평면은 그림 5의 왼쪽과 같은 구조로 가정하였으며, 세대와 외기사이에 창이 설치되어 있고 부속실에서는 계단실과 비상용 승강기가 접해있다. 부속실과 계단실 그리고 승강기의 승강로는 난방이 되지 않지만 건물내부에 면해있기 때문에 세대내부보다는 낮고 외기보다는 높은 온도인 10°C로 가정하였다.

세대와 외기사이의 연돌효과로 인한 최대압력차를 식1을 이용하여 계산하면, 무려 236 Pa이나 되지만, 이 값은 각각의 세대가 층간구획이 되지 않은 단일 샤프트에서 외기와 최대 압력차를 의미할 뿐이다. 실제 화재시 세대로부터 계단실로의 연기유입을 방지하기 위해서는 계단실과 세대사이의 압력차가 중요하다. 그러나 피난시 문을 개방하는데 드는 힘은 부속실과 세대사이의 압력차에 영향을 받기 때문에 부속실과 세대사이의 압력차를 분석하였다.

분석결과는 그림 6과 같다. 우선 모든 층이 닫힌 경우에서 부속실과 세대사이의 압력차는 그림 6에서 파란색 직선으로 표시되어 있다. 압력차는 대략적으

로 최소 -120 Pa, 최대 120 Pa정도가 되고, 중성대는 건물의 중간층인 50층에 위치하는 것을 알 수 있다. 피난구 개방에 드는 힘 110 N은 2.1×0.9 m크기의 방화문의 경우 식2에 의해 계산하면, 대략적으로 85 Pa정도가 된다. 즉, 부속실과 세대사이의 압력차가 85 Pa을 초과할 경우에는 문의 개방이 어려워진다는 것을 의미하는데, 그림 6을 보면 86층 이상부터 모두 이 범위를 초과하고 있다. 이는 평상시에도 문의 개방이 어렵다는 것을 보여준다. 반대로 저층부에서는 세대내부의 압력이 계단실보다 높기 때문에 문을 닫는 것이 오히려 어려울 것이다. 이는 저층부에서 화재가 발생한다면 닫히지 않은 문을 통하여 급속하게 연기를 계단실로 유입시키게 될 것이다.

더 큰 문제는 피난으로 인하여 계단실과 세대사이의 문의 개방될 경우 압력차에 변화가 생긴다는 것이다. 피난 중 개방되는 문의 위치에 따라서 건물전체의 압력차는 크게 영향을 받게 된다.

그림 6에서 분홍색으로 표시된 그래프는, 1,2층 계단실과 세대사이의 문의 개방되었을 때 부속실과 옥내사이의 압력차를 보여준다. 문의 열려 중성대 아래층의 개구부가 커지게 됨에 따라 중성대의 위치는 아래쪽으로 이동되어, 저층부의 압력차는 줄어들고 고층부의 압력차는 더욱 커지게 된다. 이는 86층 이상 층에서만 형성되었던 과압의 문제가 72층 이상 층까지 확대되는 결과를 초래하고 있다.

반대로 빨간색으로 표시된 그래프는, 98,99층 계단실과 세대사이의 문의 개방되었을 때 부속실과 옥

내사이의 압력차를 보여준다. 중성대 상부측의 개구부가 커지게 됨에 따라 중성대의 위치는 위쪽으로 이동되어, 저층부의 압력차는 더욱 커지고 고층부의 압력차는 줄어들게 된다. 이는 86층 이상 층에서 형성되었던 과압의 문제는 일시적으로 해소되었으나 저층부에서 압력차가 커져 계단실로의 연기유입은 더욱 강한 힘으로 발생한다. 바로 이렇게 과도한 연돌효과가 초고층건물에서의 연기제어를 어렵게 만드는 가장 직접적인 원인이 된다.

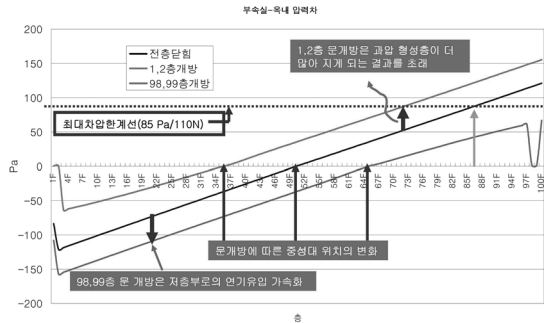


그림 6. 예제건물에서 연돌효과로 인한 건물내 압력분포의 분석

그림 7은 초고층건물에서 계단가압을 할 경우 예상되는 문제점을 보여준다. <가압 전>과 같이 연돌효과에 의해 계단실과 옥내사이의 압력차는 중성대 아래에서는 (-)로 계단실의 압력이 옥내보다 낮고, 중성대 상부에서는 계단실의 압력이 옥내보다 높게 형성되어 있다. 계단실을 가압하게 되면 압력차를 나타내는 빨간색의 그래프는 가압한 만큼 오른쪽으로 이동하게 되는데, 초고층건물에서는 적절하게 가압을 하였음에도 불구하고 <가압 후 예측1>과 같이 계단실의 일부 저층부에서는 여전히 옥내보다 계단실의 압력이 낮은 문제가 발생하게 된다. 이러한 이유는 초고층건물의 높이가 높아 연돌효과 영향이 설계차압보다 더 높게 형성되었기 때문이다. 이러한 상태에서 화재가 발생한다면 연기는 계단실로 유입될 것이고 피난은 불가능해질 것이다.

문제를 해결하기위해 보다 높은 압력으로 계단실을 가압하였다면 그림 7의 <가압 후 예측2>와 같이, 저층부 계단실의 압력은 옥내보다 높아졌으나 상층부 계단실의 압력차는 지나치게 커져 최대허용압력차를 초과하여 피난문 개방이 어려워지게 되는 문제

가 발생된다. 이는 연돌효과에 의해 발생하는 압력차만으로도 피난구의 개방이 어렵다는 것을 의미한다.

결론적으로 초고층건물에서는 과도한 연돌효과 영향으로 제연설비의 성능을 기대할 수 없게 되고, 이는 연기제어의 실패를 가져와 화재시 매우 위험한 상황을 초래하게 된다. 따라서 연돌효과 영향을 최소화 하기위한 적절한 수준의 계단실의 수직분할과 Fail safe의 관점에서 일정높이마다 별도의 대피공간 설치를 고려할 필요가 있다.

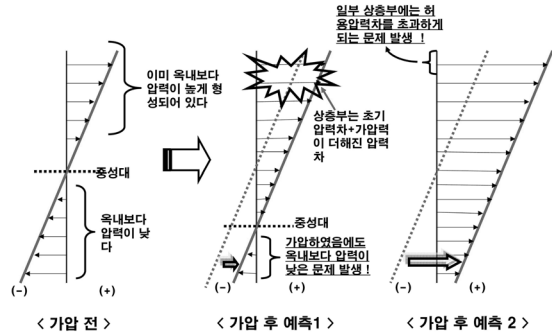


그림 7. 초고층건물에서 예상되는 계단가압의 문제점

### 제5장 문제점의 해결

초고층에서, 장시간의 피난동안 계단실은 연기의 유입으로부터 마지막까지 방호되어야 하는 안전공간으로서 가장 중요하게 계획, 설계되어야 하며, 연기제어의 성능이 건물 내 인명안전의 성공과 실패를 절대적으로 좌우한다. 앞서 논의한 바와 같이, 성공적인 연기제어를 위해서는 그림 8의 오른쪽처럼 계단실은 적절한 높이로 제한되어야 하는 것을 알았다. 적절한 높이는 겨울철 연돌효과 기준이 되는 외기와 건물내 온도를 어떻게 설정하는가에 따라 달라질 수 있다. 외기의 온도는 지역에 따라 차이가 있고, 최저온도의 지속일과 빈도수 등을 고려하여 설계에 반영하여야 할 것이다.

계단실가압방식의 연기제어가 가능한 계단실의 높이제한에 관한 공식으로서는 다음과 같은 수식을 사용한다.

$$H = K \frac{\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min}}{\left| \frac{1}{T_O} - \frac{1}{T_B} \right|} \left( 1 + \left( \frac{A_{SB}}{A_{BO}} \right)^2 \right) \quad (식3)$$

여기서,  $H$ =단일제연구역 제한높이, m  
 $\Delta P_{\max}$ =계단실과 옥내와의 최대허용압력차, Pa  
 $\Delta P_{\min}$ =계단실과 옥내와의 최소허용압력차, Pa  
 $T_o$ =외기온도, K  
 $T_B$ =건물내부온도, K  
 $A_{SB}$ =계단실과 옥내의 누설면적, m<sup>2</sup>  
 $A_{BO}$ =건물과 외부와의 누설면적, m<sup>2</sup>  
 $K=0.000289$

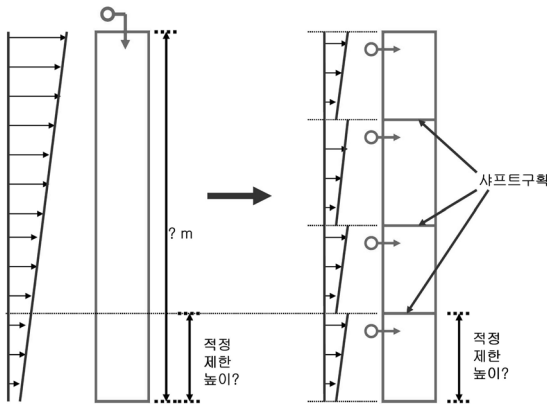


그림 8. 연기제어어의 성공을 위한 계단실의 수직분할 개념

식3을 통하여 연기제어가 가능한 계단실의 최대높이를 계산해보자. 최소설계압력차와 외기온도 등의 변수는 다음과 같이 전제하였다.

$\Delta P_{\max}=85$  Pa(문 여는 힘 110 N으로 문의 크기인 2.1×0.9 m의 방화문을 기준)  
 $\Delta P_{\min}=12.5$  Pa(NFPA의 규정을 준용함)  
 $T_o=-10^\circ\text{C}$  (263 K)  
 $T_B=21^\circ\text{C}$  (294 K)  
 $A_{SB}=0.01$  m<sup>2</sup>(계단실과 옥내사이의 피난구 누설면적)  
 $A_{BO}=0.2$  m<sup>2</sup>(건물과 외부와의 누설면적)

식3을 통하여 계산하면,

$$H = 0.000289 \frac{85 - 12.5}{\frac{1}{263} - \frac{1}{294}} \left( 1 + \left( \frac{0.01}{0.2} \right)^2 \right) = 52.4\text{m}$$

52.4 m의 의미는 상기와 같은 조건에서 급기가압

이 가능한 계단실의 최대 높이를 의미한다. 만일 52.4 m를 초과하게 되면 계단실의 바닥에서 최저설계압력차인 12.5 Pa에 미달되고, 계단실의 꼭대기에서는 최대허용압력차를 초과할 가능성이 있게 된다.

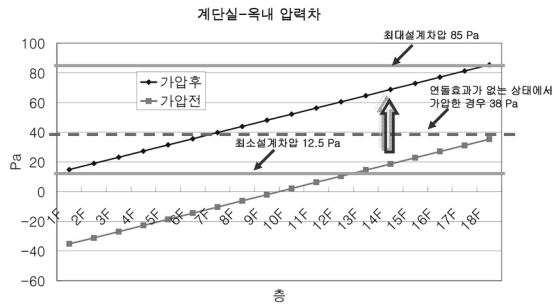


그림 9. 연돌효과가 있는 상태와 없는 상태에서의 가압시 계단실과 옥내사이의 압력차 비교

그렇다면 계산결과인 52.4 m가 적절한 높이가 맞는지 컴퓨터를 통하여 분석해보자. 비슷한 높이의 건물을 선정하기 위해 층고는 3 m, 층수는 18층인 건물을 가정하였다. 외기온도와 건물내부온도 그리고 각 공간의 누설틈새면적을 동일하게 입력한 후 컴퓨터를 통하여 연돌효과에 의한 계단실과 옥내사이의 압력차를 분석하였다. 그 다음 계단실의 바닥에서 최소압력차 12.5 Pa를 만족하도록 계단실에 급기를 한 다음 계단실과 옥내사이의 압력차를 분석하였다. 분석한 결과는 그림 9와 같다.

그림에서 가압후의 압력분포를 보면, 계단실의 바닥에서 최소허용압력차 12.5 Pa를 만족하면서, 계단실 꼭대기의 압력차는 최대허용압력차 85 Pa를 초과하지 않음으로서 적절한 계단가압이 가능하다는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 점선은 연돌효과의 영향이 없는 상태에서 측정된 계단실과 옥내사이의 압력차로서 38 Pa이 되는 것을 알 수 있다. 이 값은 연돌효과의 영향이 없는 상태에서 압력차를 측정할 때 시스템의 적정성 여부를 판단하는 기준값이 된다.

### 제6장 결론

초고층건물은 일반건물에 비하여 화재시 다음과 같은 심각한 문제점과 특징을 내포하고 있다.

- ① 피난시간이 매우 장시간 소요되기 때문에, 피난통로(피난계단실, 대피공간 등)의 연기유입을 막지 못하면 인명의 안전을 보장 받을 수 없다.
- ② 중기화재이후 급격히 성장한 화재의 영향에서도 피난통로는 장시간 화열과 연기로부터 보호되어야 한다.
- ③ 건물이 높기 때문에 연돌효과의 영향을 매우 많이 받는다.
- ④ 저층부화재시 배연창의 개방은 오히려 화재실에서 계단실내부로의 연기유입을 가속화시키는 결과를 초래할 수 있다.
- ⑤ 상층부에서는 계단실의 압력이 과도하게 높아, 옥내에서 계단실로의 진입이 불가능해질 수 있다.
- ⑥ 저층부에서는 계단실의 압력이 지나치게 낮아, 화재발생시 연기의 유입을 촉진시키고 열렸던 문이 닫히지 않는 문제가 발생하여 지속적으로 계단실로 연기의 유입을 촉진시킬 수 있다.
- ⑦ 연돌효과가 클 경우에는 계단가압을 통한 연기제어기법을 적용할 수 없다.

이러한 문제점에 대한 대책은 다음과 같다.

- ① 계단실을 수직으로 다수의 구역으로 분할하여, 연돌효과로 인한 압력차를 줄이고, 연기제어를

위한 계단가압을 용이하게 한다.

- ② 건물을 완전히 빠져나오지 않고도 장시간 안전을 확보 받을 수 있도록, 일정한 높이마다 대피층 또는 대피공간을 설치하고, 대피층과 대피공간은 열과 연기로부터 장시간 보호받을 수 있도록 계획하고 설계한다.
- ③ 배연창은 화재시 연기의 배출이 유효하게 이루어질 수 있는 중성대 상부층으로 제한하고, 바람 등의 영향으로 역압력이 작용할 경우에는 자동으로 닫히는 구조로 설치한다.

### 참고문헌

1. 여용주, “차압제연의 성능에 영향을 미치는 주요변수와 설계”, 한국소방기술사회 3차 CPD교재 “급기가압 제연기술”, 2006
2. 여용주, “급기가압제연설비의 설계적정성 분석 방법에 대한 소고”, 한국화재연구소(www.fire119.pe.kr), 2006
3. BS5588 Part4 “Code of practice for Smoke control using pressure differentials”, 1998
4. NFPA 92A “Recommended Practice for Smoke-Control Systems”, NFPA, 2006
5. Smoke Control Provisions of THE 2000IBC, 2003
6. John, H. Klote., James, A. Milke, “Principle of smoke management”, 2002
7. George T. Tamura, “Smoke Movement & Control in High-rise Buildings”, NFPA, 1994