

# Smoke dilution

## (연기희석을 통한 제연 - 사례연구)

*Howard Morgan CEng, FIFireE 의*

오래전부터 연소가스를 희석함으로써 안전을 확보할 수 있다는 인식이 이어져왔다. 심지어 피난경로가 연소가스에 노출된 경우에도 신선한 외기를 충분히 투입하여 희석할 수 있다고 본 것이다. 이 때 설계에 있어서 어떻게 이것을 정량화 하는가가 중요하다. 이러한 개념은 특히 대형 아트리움구조의 호텔(tall atrium hotel)이나 주거용 건물에서 외기에 개방된 발코니를 설치할 수 있는 수단으로 특히 매력적이다. 전 세계의 대형 아트리움형 호텔은 이러한 개념을 적용한 설계를 하고 있다.

본 고에서는 이런 특징을 지닌 가상의 건물에 대한 사례를 연구하였다. 본 연구는 BRE(Building Research Establishment: 영국건물연구소)에서 실시한 스프링클러실험의 측정치를 문이 개방된 상태로 고정된 침실에서 어떻게 적용하여 설계할 것인지에 대한 정보를 제공한다. 이는 아트리움 제연시스템의 세부사항 뿐만이 아니라 연기를 배출하는 팬의 최소요구량을 결정하는 것과도 관련된다.

아트리움형 건축물은 어떤 경우에도 아트리움화재의 가능성을 무시할 수 없다. 수치계산은 화재하중이 제한된 상태에서 잠재적 연료물질을 모두 배출시키는 아트리움 팬을 설계하는 것을 말한다.

### 연기희석 설계(Smoke dilution design)

정량화된 연기희석 설계에 있어서 중요한 관점 가운데 2가지를 들자면 다음과 같다. 첫째, 연기가 발생할 때 발생속도를 알 수 있어야 하며, 특정 시나리오의 상황에도 적절하여야 한다. 이제까지 논문에 어느정도 활용가능한 자료는 있었지만 최근까지 스프링클러설비가 설치된 공간(room)에 대한 자료는 없었다. 설계시 이런 어려움은 BRE report 204505(보고서 204505: 2004년 주거건물에서 스프링클러설비의 유효성)에서 제시되었다. 이 보고서는 주거용 건축물의 방을 모의실험하여 스프링클러설비의 효과를 연구한 자료이다. 둘째, 연기가 건물내를 이동함에 따라 연기속으로 공기를 혼합하는 과정을 수량화할 수 있어야 한다.

잉글랜드와 웨일즈에서 설계 요구사항에 대한 기준은 BS 5588-7:1997(1)와 건물규정에 관

<sup>(1)</sup> BS 5588-7 : Fire precautions in the design, construction and use of building  
Code of practice for the incorporation of atria in buildings

한 ADB<sup>(2)</sup>이 있다. ADB(화재안전에 관한 영국의 건물규제 내화성능기준 승인문서B)는 아트리움형 건물에 대한 실제코드로 인용되었다. [2008년 현재 BS 5588-7(건물에서 아트리움의 편입에 대한 실무코드)은 BS 9999<sup>(3)</sup>(건물사용과 설계, 관리에 있어서 화재안전을 위한 실무코드)로 편입됨].

BS 5588-7의 예제21번에 요약된 내용이 권고사항의 기초가 된다. 이런 안내지침은 아트리움형 호텔에 적용된다. 구체적으로는 스프링클러설비가 모든 방에 설치되고 발코니통로는 제연조건에 적합한 화재공학적 제연시스템을 갖추는 것이다. 또 각층의 발코니로부터 적어도 2개소 이상의 피난통로를 요구한다. 연구는 이런 전제조건에서 출발하여 화재공학적 방법에 의해서 정의되어야 한다.

화재 발생시 방호에 있어 가장 중요한 것은 방화구획이다. 호텔방 사이의 칸막이뿐만 아니라 출입문과 아트리움 또는 방의 벽은 내화구조이어야 한다. 둘째는 모든 실에 스프링클러설비를 설치하는 것이다.

예를 들어 개방상태로 고정된 출입문 또는 아트리움바닥에서 화재가 발생하는 경우 방화구획에 구멍이 생길 때 연기는 화재층의 아트리움으로 유입된다. 짐가방 등으로 인해 침실 출입문이 개방된 경우는 비관적인 결과를 초래할 수 있다.

발코니가 피난과 소방통로로 사용할 수 있게 남아있으려면 아트리움으로 들어가는 연기는 충분히 희석되어야 한다. 즉, 필요한 양의 희석을 위해서는 용량이 큰 옥상팬이 있어야 함을 의미한다. 우리는 아트리움에서 연기와 공기를 혼합할 것을 권장한다. 그리고 생겨나는 연기층이 안전한 농도로 희석된다면 사람들은 노출된 발코니를 이용하면서 피난할 수 있을 것이다. 연기와 열배출 환기 시스템을 설계할 때 연기층 사이에서 피난로를 확보하려 한다는 것은 전통적인 제연이론에는 모순이다.

팬의 배출로 인해 신선한 공기가 아트리움 하부의 유입구로 들어오면서 연소가스와 공기는 상승기류를 형성하게 된다.

아트리움 측 개방된 발코니로 유입되는 연기, 특히 화재층과 그 직상층으로의 연기유입은 아트리움 홀 측에 차연막을 설치함으로써 감소할 수 있다. 그 차연막은 발코니 위 빈공간의 연기플럼에 의해서 화재가 발생한 층의 직상층 발코니를 보호하는데 도움을 준다. 이런 차연막은 떨어지는 커텐일 필요가 없고 고정식으로 제작될 수도 있다.

## 화재 시나리오 (Fire scenarios)

우리는 호텔침실과 주거용침실, 호텔룸과 주거용라운지룸의 유사점에 주목하면서 논의를 시작할 수 있을 것이다. 우선 *BRE report 204505*의 실험결과를 적용하였다. 스프링클러가 설치된 상황에서의 화재실험과 스프링클러가 미설치된 상태에서의 화재실험은 다양

<sup>(2)</sup> ADB : Approved Document B(화재안전에 관한 영국의 건물규제 내화성능기준 승인문서B)

<sup>(3)</sup> BS 9999 : Code of practice for fire safety in the design, management and use of buildings

한 시나리오를 포괄하기 때문에 우리는 주변상황에 따라 시나리오를 선택하여야 한다.

BRE에서 실시한 실험은 두 종류인데, 하나는 실물 화재실험이며, 다른 하나는 복도를 통하여 화재실과 연결된 하나 또는 두 개의 실을 축소제작하여 실험하였다.

연구의 중점은 연기가 화재실 문을 통과한 뒤 아트리움으로 흐르는 경로이다. 따라서 설계한 화재처럼 출입구에서 흐름을 선택할 수 있다. 또한 출입구에서 조건이 적절하도록 시험장치내 인접공간에서 광학밀도 측정값을 취할 수 있다.

여기에 관한 실험자료 그래프는 BRE report의 부록 5.C 와 5.G에서 찾을 수 있다.

문이 열린 호텔방과 비슷한 어떤 시나리오에서도 이러한 인접공간내 미터당 광학밀도가 2.0를 초과하지 않았다. 우리는 전통적인 측정으로 설계화재에 적절하도록 미터당 광학밀도를 3.0으로 취했다.

아트리움에 인접한 공간에 스프링클러설비가 설치되고 공간과 아트리움사이가 내화구조로 분리된 것은 다음과 같다. 현재 연구와 연관된 단순한 시험형상으로 물을 배출하는 스프링클러설비를 설치한 개방된 문이다.

### 문이 열린 침실(Bedroom with open door)

우리는 출입구에서 우리의 설계화재를 기술하기 위해서 기체온도를 설정할 필요가 있다. 심지어 영국건물연구소 시험에서 항상 소화되진 않더라도 스프링클러가 설치된 시험에서 연기온도는 전형적으로 대기온도보다 약 10도 정도 낮은 수치로 감소했다.

인정되는 기준으로 제안되듯이 문이 열리고 그 상태가 지속된다면 20℃의 방으로부터 아트리움으로 유입되는 연기의 양을 예상할 수 있다. 스프링클러설비가 작동한 후의 가스 시나리오에서 20℃의 높은 온도는 매우 높은 수치이며 이는 비관적일 수 있다.

우리는 아트리움으로 들어가는 연소가스의 유속을 예상하기 위해 모건의 19방정식(4) (개구부를 향해 수평으로 흘러가는 부력이 있는 기체들에 적용하는 방정식)을 사용하였다. 이 방정식은 출입구처럼 좁은 개구부를 통하여 유출되는 것에 적용한다.

$$M = \frac{2}{3} C_d (2gT_{ambient}\Theta)^{0.5} \frac{\rho_{ambient}W}{T} d^{1.5} K_m \quad \leftarrow \text{방정식1}$$

$C_d$  : 복도 (doorway)에서의 방출상수 (discharge coefficient)

$g$  : 중력가속도 ( $m/s^2$ ) = 9.81

$T_{ambient}$  : 절대온도 303도로 선택된 대기온도의 절대온도, 즉 뜨거운 여름 외부 온도인 대기온도 섭씨 30도

$\Theta$  : 섭씨 20도로 설정된 연기나는 가스의 대기온도

$\rho_{ambient}$  : 이런 온도에서 대기공기밀도 1.162kg/m

$W$  : 약 1.0m로 취해진 개구부의 폭

$T = T_{ambient} + \Theta(K) = 323K$

d : 또 1.0m로 취해진 개구부를 빠져나와 흐르는 연기층의 깊이

$K_M$  : 전형적으로 1.3으로 취해지는 형상수정계수

우리는 출입구를 통하여 흐르는 배출계수를 0.78로 채택하였다. 우리는 몇몇 가정을 통하여 계산을 단순화하였다. 출입구 1m옆 개구부까지 유출량은 2m의 위쪽 절반을 차지한다고 가정하여 방정식1에 수치를 적용하여 출입구를 통한 유속을 0.84로 얻을 수 있었다.

### 희석 후 가시도 (Visibility after dilution)

출입구를 통한 체적유량은

$$V_{door} = \frac{M}{\rho_{door}} \quad \leftarrow \text{방정식2}$$

$\rho_{dr}$  : 흘러나가는 연소가스의 밀도

방정식3에 적절한 값을 대입함으로써 문의 밀도(1.09kg/m)를 얻었다.

$$\rho_{door} = \frac{\rho_{ambient} T_{ambient}}{T} \quad \leftarrow \text{방정식3}$$

위의 값과 방정식2를 통하여 우리는 출입구를 통한 체적유량을 얻는다.

$$V_{door} = 0.77m^3/s$$

기체가 건물을 통해 이동할때 연소가스와 공기사이에 대부분의 혼합과정을 고려하는 안전한 접근 방식을 통하여 우리는 연기입자의 노화를 무시할 수 있다. 반면에 역으로 미터당 광학밀도는 입자를 포함하는 부피에 비례한다.

체적유량이 중앙홀로부터 배출되는 배기팬 용량과 같아질 때까지 출입구를 통과해오는 연기는 아트리움에 있는 공기와 섞일 것이다. 난류혼합의 결과로 미터당 광학밀도의 수치는 감소되면서 연기입자는 더 큰 공간으로 퍼진다.

희석된 연소가스내에서 전통적인 10m의 가시도에 부합하는 미터당 0.1의 광학밀도를 달성하기 위해 배기팬에 의해 생겨야할 배출체적유량은 다음과 같이 주어진다.

$$V_{exhaust} = \frac{T_{doorway}}{T_{atrium}} V_{door} \quad \leftarrow \text{방정식4}$$

T는 미터당 광학밀도이다

(4) equation 19 of Morgan : Fire Safety Journal 11, pp193-200, 1986

$$V_{\text{exhaust}} = 3.0 \times \frac{0.77}{0.1} = 23.1$$

← 방정식5

이 수치는 추가적 안전여유를 고려해 25까지 수렴될 수 있다.

미터당 광학밀도의 수적인 가치는 미터당 가시도의 상대성과 매우 밀접하다. 2005년 CIBSE GUIDE E<sup>(5)</sup>에 출간된 것처럼 아트리움에서 희석된 연기내의 가시도는 8m한계를 만족할 것이다. 안내서에 있는 화재공학 방정식 5는 어떤 목표값으로 아트리움 팬의 배출용량을 증가시킴으로써 안전여유율을 올리는데 사용할 수 있다.

## 연기 차단막(Channelling screens)

개방된 발코니는 아트리움의 개방부이기도하다. 특히 화재층과 그 직상층에서의 이러한 위험성은 아트리움 홀층에 차연막을 설치함으로써 감소할 수 있다. 이 차연막은 화재층의 연기가 멀리 퍼지지 못하게 막을 것이다. 또 그 발코니(노대)위에 놓인 플럼(plume) 직근에 위치한 발코니(노대)를 보호하면서 연기가 아트리움 앞으로 나아가도록 할 것이다.(그림 1, 그림2 참조)

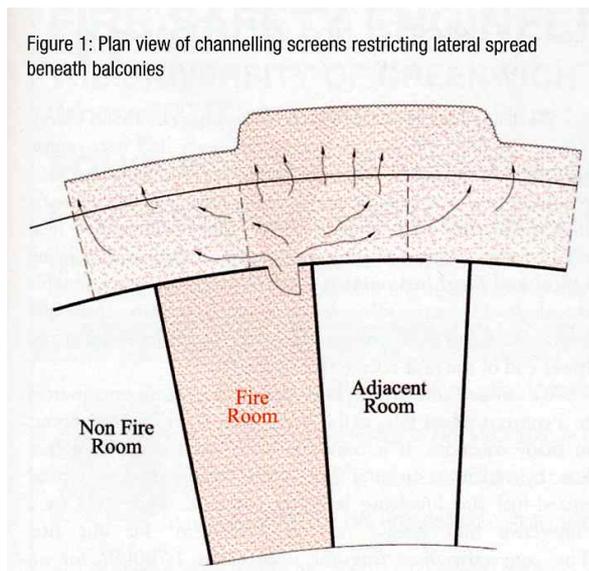
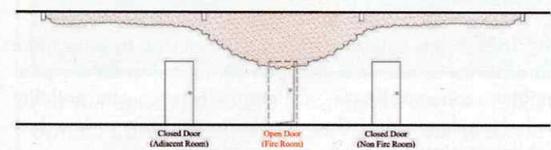


Figure 2: Section view of channelling screens restricting lateral spread beneath balconies



두 개의 차연막 사이에 퍼지는 연기의 양은 막 사이를 분리하는 것과 막의 깊이가 서로 상충되어 영향을 미치게 된다. 특히 이번 사례연구에서는 일부연기가 화재실의 출입구바깥에 있는 첫 번째 막으로부터 다음 인접막까지 측면으로 흘러갈 것으로 예측되었다. 그 때문에 얇은 막이 준비되었고 Zone model계산도 자신있게 진행하지는 못하였다.

넓은 개구부가 있는 이용가능한 최고의 실험적인 연구(Harrison R. and Spearpoint, M., Spill over, Fire Engineers Journal, 65 (258), pp33-35, 2005)와 비교해서 연기가 출입구에서 아래 발코니(노대) 계단 아래면(soffit)으로 올라가고 이 열기류가 출입문과 같은 좁은

<sup>(5)</sup> CIBSE GUIDE E : Chartered Institution of Building Services Engineers GUIDE E(영국 건물서비스 기술사회 안내서 화재공학편)

개구부 등 다양한 형상을 만들기 때문에 연소가스에 동반되는 것이 있을 것이라는 점에서 더욱 복잡하다. 우리는 엄격히 적용하지는 않더라도 그들의 작업이 나타나는 것을 기대할 수 있다.

해리슨과 스피어포인트는 연기가 화재실 출입구로부터 아래 발코니(노대) 계단 아래면(soffit)에까지 올라감에 따라 동반되는 것 때문에 생겨나는 연소가스의 질량유량의 변화에 대해 다음의 수정된 공식을 유도했다.

$$M_b = 0.89 \left( \frac{h_{u-b}}{h_{door}} \right) M_d \quad \leftarrow \text{방정식6}$$

$M_b$  : 발코니아 아래 질량유량을 (kg/s)

$h_{u-b}$  : 출입구 개구부의 바닥위에서 발코니 아래 soffit(아치계단의 아래면)사이의 높이이다.

$h_{door}$  : 출입구 개구부의 높이이다.

$M_d$  : 출입구를 통하여 흐르는 질량유량이고 방정식1에서 계산된다.

우리가 전형적으로 대표적 수치인  $h_{u-b}$ 를 3.0m  $h_{door}$ 를 2.0m로 택한다면 우리는 위의 방정식1로부터  $M_d = 0.84\text{kg/s}$ 로 얻는다.

같은 값을 방정식6에 대입하면  $M_b = 1.12\text{kg/s}$ 로 얻는다.

대류열전속은 출입구를 통과하는 연소가스 속에서 크게 변하지 않을 것이다. 연소가스가 스피릿지(spill edge)로 이동함에 따라 역으로 연소가스는 질량유속에 비례하여 대기보다 높은 온도를 가질 것이다.

$$\Theta_b = \Theta_{dr} \frac{M_d}{M_b} = 20 \frac{0.84}{1.12} = 15.0^\circ C \quad \leftarrow \text{방정식7}$$

우리는 위에 방정식1과 유사한 모건의 방정식을 적용할 수 있다. 그러나 이 식은 보이드 엣지(void edge)가 없을 때 연기가 넓게 흘러가는 경우에 적용된다.

$$M_b = \frac{2}{3} C_d^{1.5} (2gT_{ambient} \Theta_b)^{0.5} \frac{\rho_{ambient} W}{T_b} d^{1.5} K_M \quad \leftarrow \text{방정식8}$$

$M_b$  : 위 방정식 6에서 계산된다.

$C_d$  : 우리의 예에서 출입구 배출계수는 1.0이다.

$g$  : 중력가속도 ( $m/s^2$ ) = 9.81

$T_{ambient}$  : 절대온도 303도로 선택된 대기온도의 절대온도

$\Theta_b$  : 섭씨 15도로 설정된 연기나는 기체의 대기온도

$\rho_{ambient}$  : 대기공기밀도 1.107kg/m

W : 개구부의 폭이다.

$$T_b \text{ is } T_{ambient} + \Theta_b (K) = 318K$$

d : 개구부밖으로 흐르는 연기층의 깊이(m)

$K_M$  : 형상수정계수이다. 보통 값은 1.3으로 한다.

방정식 8은 W를 구하기위해 재배열될 수 있다.

$$W = \frac{3M_b T_b}{2C_d^{1.5} (2gT_{ambient} \Theta_b)^{0.5} \rho_{ambient} d^{1.5} K_M} \quad \leftarrow \text{방정식9}$$

차연막의 폭을 d로 선택함으로써 얻어지는 결과값(w)은 연소가스 유동이 수평차단된 상태에서 연기가 아트리움으로 통과한 엣지(edge)의 길이이다.

우리는 d=100mm로 하고 이 모든 수치를 방정식9에 대입하면 w=39.3m이다.

이 계산은 흐름이 전체길이를 따라서 스페일엣지(spill edge)의 수직방향으로 진행된다는 가정에 바탕을 두었다. 이것은 매개차단막아래에서 이웃막으로 연기가 흐르는 경우에는 타당하지 않다. 우리는 연기를 통과하는 스페일엣지의 실제길이가 짧아질 것으로 예상한다. 비록 계산된 값(W)이 비관적이지만 측정가능하다는 것을 알 수 있다.

우리는 방정식9를 주목할 필요가 있다. 어떤 다른 변화된 수치가 없다면  $w^{1.5}$ 은 일정한 상수이다.

예를 들어 차연막 깊이를 150mm로 증가시킨다면 아트리움에 연기가 통과하는 스페일엣지의 최소길이는 21.4m까지 감소될 것으로 보인다. 이는 차연막의 깊이와 차연막 사이의 분리에 본질적인 취사선택이 될 수 밖에 없음을 나타낸다.

### 아트리움바닥에서 화재(Fire on atrium base)

이 기사에서 우리는 우선 아트리움 바닥에서 BS 5588-7(건물에서 아트리움의 편입에 대한 실무코드)의 제한적 화재하중을 고려하였다. 제한적 화재하중에 대하여 제시된 기준은 다음을 포함한다.

- 아트리움 바닥에서 가연물의 전체질량이 160kg을 초과하면 그 물질은 특정공간에 격리되어야 한다. 실제로 호텔은 가구, 커피탁자, 수속대 등의 가연물이 있다.
- 각 공간의 최대연소가능물질은 160kg, 최대마루면적은 10m<sup>2</sup> 이다.  
(각 공간은 스프링클러설비로부터 보호받는 지역을 제외하고는 연소가능물질로부터 적어도 4m는 격리되어야 한다.)

불행히도 위 기준에 적합한 물질의 위치는 그리 간단하지 않다. 그리고 우리는 단일연료 물질이 허용되는 최대면적을 3m<sup>2</sup> 로 하기 위해서 BS 5588-7(건물에서 아트리움의 편입에 대한 실무코드)에 있는 안내사항은 아트리움의 상황에 따라 수정할 필요가 있다는 것을 알게 되었다.

우리는 하나의 독립된 공간에 대하여 최고연소속도를 평가할 수 있어야 한다. 우리는 BS 7346-4(6)(열과 연기 배출 환기시스템에 대한 기능적 추천사항과 계산방법)에서 보았다. 사무실과 호텔방의 경우 객관적으로 비슷한 연료가 배치되었다고 가정하면 열방출율밀도로 추천된 실무코드는  $255\text{kW}/\text{m}^2$ 이다. 보통 독립된 공간들에 대해 적용가능한 전통적인 값으로 이와같은 수치를 채택하는 것은 합리적이다. 일반적으로 그 수치는 열방출율 스펙트럼의 낮은 끝에 있는 경향이 있다.

우리는 또한 열방출율은 대류열선속으로 변환되어야 한다는 것에 주목할 수 있다. 이는 많은 방정식에서 열이 나타나는 형태의 화재이기 때문이다. 건물내에 있는 사물을 관련시키는 전형적 혼합연료인 경우는 화재플럼이 보통 복사에 의하여 1/3의 열손실이 있다고 평가한다. 이는 우리가 논의한 화재에 대한 대류열방출율이  $170\text{kW}/\text{m}^2$  라고 제시한다. 그러므로  $10\text{m}^2$ 의 화재가 발생한 공간에 대한 전체 대류열선속은  $1700\text{kW}$ 이다.

### 가시도와 부피(Visibility and volume)

CIBSE의 안내서 E의 10.7항에서 나타나듯이 좀 더 근본적인 중요자료를 사용하면 보통 부속 사물이 포함된 건물화재에 대해서 화재시 연기가 섞이는 부피와 가시도에 대한 관계를 유도하는 것이 가능하다. 빛을 방출하는 출구표지에 대한 이 방정식은 다음과 같다.

$$S = 545 \frac{V}{Qt} \quad \leftarrow \text{방정식10}$$

S: 가시거리(M)

V: 체적

Q: 대류열선속

T: 연기가 흐르는 시간

$V/t$ 는 정상상태에서 계산된 체적유량율이며, 팬에 의해 배출되는 체적유량율이다. 우리 예제에서  $25\text{m}^3/\text{s}$ 이다.

방정식 10에 적절한 수치를 대입하면,

$$S = 545 \frac{25}{1700} = 8.0$$

반사된 빛에는 방정식이 아래와 같이 된다.

$$S = 205 \frac{V}{Qt} = 205 \frac{25}{1700} = 3.0 \quad \leftarrow \text{방정식11}$$

타당성을 얻기위해 가시도에 한정된 수치는 영국 건물서비스 기술사회 안내서 E에서  $8\text{m}$  라고 제시되어 있으며, 이는 최대화재 크기가 BS 5588-7(건물에서 아트리움의 편입에 대한 실무코드)에서 허용된 면적 중 약 삼분의 일이 되어야한다는 것을 의미한다.

(6) BS 7346-4 : Components for smoke and heat control systems — Part 4: Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady-state design fires

## 사례연구 결과(Case study outcomes)

이 계산결과를 토대로 실로 통하는 유일한 통로가 개방된 발코니를 경유하는 구조를 가지는 아트리움호텔과 주거용 아트리움건물에서의 연기회석시스템은 실용적이라는 것을 알게 되었다. 이러한 결론은 연기제어(제연) 역할을 수행하는 적정 수치를 적용함으로써 도출되었다.

이러한 수치는 수용가능한 양의 회석에 도달하기 위해서 실과 아트리움과의 내화구조건 축물, 실 사이의 내화구조건축물, 실내 스프링클러설비, 충분히 큰 연기를 배출하는 공기 그리고 아트리움을 통하여 동반 상승하는 연기 등의 조건을 계산에 반영한 결과이다.

또한 아트리움 하부가 스프링클러로부터 유효하게 방호되지 않더라도 수치를 계산해봄으로써 수용가능한 최대 화재하중을 채택하여 적용할 수 있으며, 그 계산의 결과는 BS 5588-7(건물에서 아트리움의 편입에 대한 실무코드)에서의 특정한 상황과 일치하지 않을 수 있다.

---

출처 : Fire Risk Management (2009 Nov.)

번역 : 부산경남지부 장재훈