

Vent openings & fire

많은 소방관들이 화재 진압 활동 중 환기구를 만들어 사용하는 것에 대해 혼란스러워 하고 있습니다. 벨기에에서는 일반적으로 화재가 진압된 후에 양압 환기(PPV)를 시작하고 있습니다. 이러한 방식으로 실시하는 환기는 화재 행동에 영향을 미치지 않습니다. 다른 국가에서는 화재 진압 중 또는 내부 공격 전에 환기를 시작하는 것이 관례입니다. 특히 공격 전에 이러한 환기를 실시하는 것은 화재 행동에 영향을 미칠 수 있습니다. 자연환기를 실시 하더라도 그렇습니다. 소방관들은 현관문을 여는 것이 자연환기와 같다는 것을 깨닫는 것이 중요합니다. 이는 (PPV가 없는) 벨기에식 접근법도 화재 행동에 영향을 미칠 수 있음을 의미합니다.

1 Influence on fire behavior

환기구가 화재 행동에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 우선 화재 행동 자체를 이해해야 합니다. 여기서 우리는 다음의 두 가지 다른 유형의 화재 행동을 알아야 합니다. "환기"¹되는 화재행동과 "환기"가 부족한 화재행동입니다. 이 두 용어를 정의하기 위해서는 먼저 "연료 지배형"과 "환기 지배형"이라는 두 가지 연소 방식을 설명해야 합니다.

1.1 Burning regimes

화재가 시작될 때에는 소량의 물질만이 연소에 관여합니다. 격실 내부에는 작은 화재에 필요한 만큼의 충분한 공기가 있습니다. 재료의 특성(연료)과 실내에서 연료의 분포가 화재 행동을 결정합니다. 중요한 속성은 불꽃 확산 속도, 불꽃이 표면 위로 번지는 속도, 그리고 연료가 에너지를 생산하는 속도인 열 방출 속도입니다. 화재의 초기 단계에서는 화재의 진행을 연료가 조절합니다. 그래서 "연료 지배형(fuel controlled)" 화재라고 불립니다.

잠시 후 화재는 더 성장합니다. 산소 농도가 낮아지는 동안 온도는 상승합니다. 연기층이 만들어지고 잠시 후, 연기 층이 점화될 것입니다. 이 때문에 연기층 아래의 연료를 향한 복사열이 크게 증가하고 플래시오버가 발생합니다. 이 시나리오가 일어나려면 충분한 양의 공기를 이용할 수 있어야 합니다. 이것은 문이나 창문을 열려 있어야 한다는 것을 의미합니다. 또 다른 가능성은 화재 발생 시 유리창(예: 유리창 한 장)이 깨어져 있어야 하는 것입니다.

플래시오버 후, 격실 전체가 화염에 휩싸였습니다. 화재는 사용 가능한 모든 틈새로 공기(산소)를 빨아들입니다. 화염이 건물 밖으로 분출되는 전형적인 모습도 보입니다. 급기구를 통해 들어오는 공기 공급량이 화재 진행에 부족하기 때문입니다. 내부에서 충분한 산소를 공급받지 못하기 때문에, 화재 가스의 일부가 건물 외부에서 연소됩니다. 건물 밖에는

¹ Ventilation 과 관련된 용어를 표준국어대사전에서 찾아보았습니다. 번역 시 문맥을 고려하여 ventilation 을 '환기'와 '배연'으로 번역하였습니다.

- ① 환기(換氣): (탁한) 공기를 (맑은) 공기로 바꾸는 것.
- ② 배연(排煙): 연기를 뽑아내는 것.
- ③ 배기(排氣): 공기를 뽑아내는 것. ④ 급기(給氣): 공기를 집어넣는 것.

산소(공기)가 풍부합니다. 화재의 강도는 더 이상 가용 연료에 의해 결정되지 않습니다. 무슨 일이 일어날지를 결정하는 것은 환기입니다. 격실에 유입되는 산소 1kg 당 약 13.1 MJ의 에너지가 생성(Thornton's Rule)될 수 있습니다. 사실상, 1 m³의 공기당 3 MJ의 에너지가 생성될 수 있습니다. 1 m/s의 속도로 공기가 2 m²의 도어 입구를 통해 유입될 때 6 MW의 화재 에너지가 공급될 수 있습니다. 이제 환기가 무슨 일이 일어나는지 결정하므로, 화재는 "환기 지배형(ventilation controlled)"으로 바뀝니다.

1.2 Two types of fire behavior

1.2.1 The ventilated fire behavior

환기되는(환기가 양호한) 화재 행동은 5 단계로 이루어 집니다. 화재는 초기 단계에서 시작되어 성장 단계로 진행합니다. 두 단계 모두는 연료지배형 화재 입니다. 다음에는 플래시오버가 발생합니다. 이 단계에서 화재는 연료 지배형에서 환기 지배형으로 전환됩니다. 네 번째 단계는 완전히 성장(발달) 한 화재 입니다. 이 단계에서 화재는 환기 지배형이 됩니다. 실내의 연료가 다 떨어지면, 화재가 감소할 것입니다. 산소의 필요성도 떨어집니다. 어느 시점에서는 화재가 연료 지배형 상태로 되돌아갑니다.

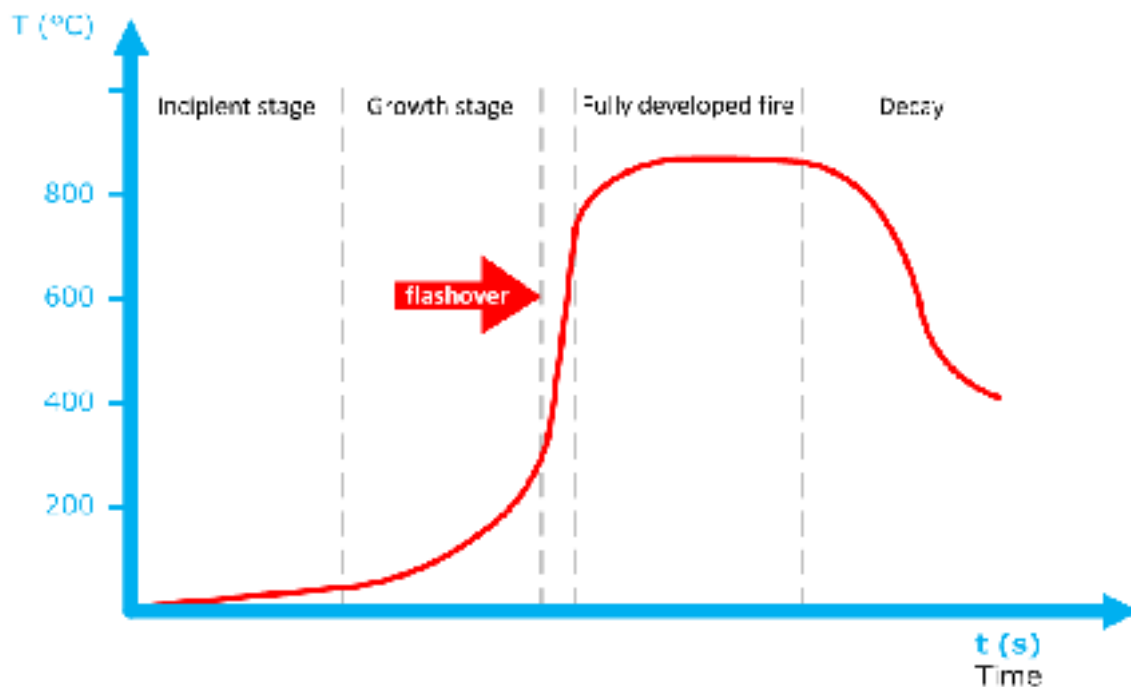


Figure 1 The ventilated fire behavior (*Graph: Karel Lambert*)

환기가 양호한 화재 행동은 연료 지배형 화재에서 시작한 다음 환기 지배형 화재로 전환되고 그 후에 다시 연료 지배형 화재로 전환됩니다.

1.2.2 The under ventilated fire behavior

환기가 불량한 화재의 행동은 환기가 양호한 화재의 행동과 동일하게 시작됩니다. 초기 단계에서 화재는 연료 지배형 상태입니다. 성장단계에서도 연료 지배형 상태입니다. 환기가

가능한 개구부의 가용성에 따라 이 후 행동이 달라집니다. 개구부가 거의 또는 전혀 없을 때 산소 농도는 급격히 감소 합니다. 화재는 플래시오버가 일어나기 전에 환기 지배형 화재로 전환 될 것입니다. 화재는 저절로 꺼지거나 소방대에 의해 꺼질 때까지 환기가 통제된(환기 지배형) 상태로 유지될 것입니다.

"환기가 불량한 화재는 플래시오버가 발생하기 전에 환기 지배형 화재로 성장한(변화한) 화재 입니다."

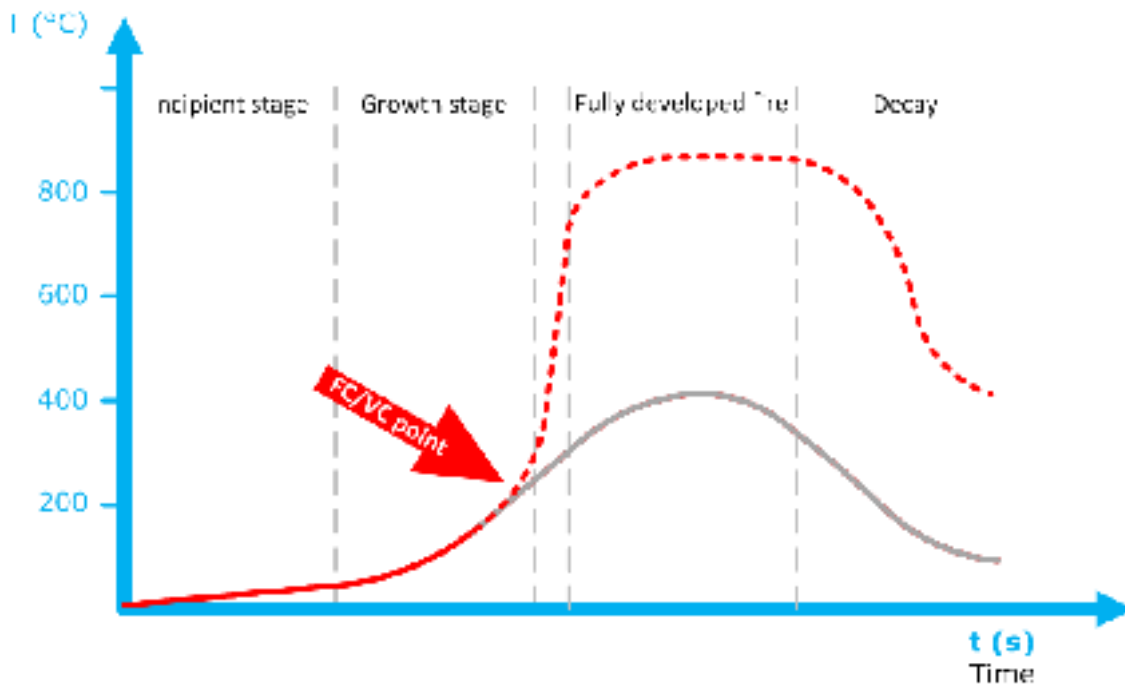


Figure 2 The under ventilated fire behavior: the red line indicates the part that is the same for both types of fire behavior. The dotted red line depicts the natural or ventilated fire behavior while the gray line depicts the under ventilated fire behavior. (Graph: Karel Lambert)

환기가 불량한 화재도 연료 지배형 화재에서 시작되지만 환기가 양호한 화재에 비해 훨씬 더 빨리 환기 지배형 화재로 바뀝니다. 이것은 플래시오버 발생 이전에 환기 지배형으로 전환 되는 것을 의미합니다. 그리고 불이 꺼지거나 꺼질 때까지 환기 지배형 상태로 남아 있습니다.

1.3 Influence of ventilation

미국에서는 화재진압 활동 중에 환기를 하는 것이 일반적인 절차 입니다. 이것은 대부분 여분의 환기구가 만들어진다는 것을 의미합니다. 창문을 깨뜨리거나(수평 환기) 지붕에 개구부를 만들어(수직 환기) 여분의 환기구를 만들 수 있습니다. 대부분의 경우 자연환기가 이루어집니다. 즉, 양압 배연을 위한 송풍기가 사용되지 않습니다. 우리는 유튜브에서 환기가 상황을 통제할 수 없게 만드는 수 많은 화재 동영상 확인 할 수 있습니다.

한편, 어느 순간, 누군가가 진압 활동중에 환기 전술을 생각해 냈습니다. 미국에서는 이 전술이 벤자민 프랭클린 (1706 ~ 1790)에게도 인정받았습니다. 이 발명가와 소방관들은 화재진압 작업 중에 연기를 제거하는 전술을 고안해 내었습니다. 그 전술은 몇 년 동안 계속해서 매우 좋은 결과를 낳았습니다. 이는 과거의 화재의 행동이 오늘날과 달랐기 때문입니다. 과거의 연료는 주로 천연제품으로 이루어져 있었는데, 오늘날의 연료는 주로 석유 화합물로 이루어져 있습니다. Steve Kerber 는 (화재가 시작하고) 플래시오버가 발생할 때까지의 시간이 과거에 비해 엄청나게 줄었다는 것을 보여주었습니다. 이 시간은 50년대에는 약 30 분 정도였고 현재에는 3 ~ 4 분으로 단축되었습니다. 이것은 현재의 화재가 과거보다 훨씬 짧은 기간 동안만 연료 지배형 상태라는 것을 의미합니다.

연료로 지배형 화재에 환기를 가하는 것은 화재 행동에 거의 영향을 끼치지 않습니다. 화재의 행동은 결국 연료의 특성에 의해 결정됩니다. 때문에 미국에서 과거의 화재 현장에서는 진압활동 중 환기가 오랫동안 표준 전술이었는데를 설명하는 대목입니다. 20 세기 후반까지 그것은 매우 좋은 전술이었습니다.

현대 건물에서 화재는 매우 빠르게 환기 지배형 상태로 됩니다. 화재가 플래시오버 단계로 진행 되기 전에 환기 지배형이 되었을 때, 우리는 환기가 불량한 화재 현장에 직면하고 있는 것입니다. 이런 종류의 화재는 최근 점점 더 많이 발생하고 있습니다. 환기가 불량한 화재실의 벽면에 구멍이 생기면 화재의 열 방출률이 높아집니다. 이러한 유형의 화재에서는 환기가 차후의 화재 행동을 결정합니다. 여분의 개구부가 만들어지면, 화재 현장에 추가적인 환기가 가능해집니다. 개구부의 표면적과 높이에 따라 화재가 만들어낼 수 있는 최대 출력을 계산하는 공식은 서로 다릅니다. 높이 2m, 폭 0.9m 의 문을 열면 화재실의 화력이 3 ~ 4MW 까지 상승할 수 있으며 폭 2m, 높이 1.5m 의 유리창을 깨뜨리면 4.7 ~ 5.5MW 의 화력이 만들어 집니다.

따라서 환기가 잘 되지 않는 화재를 진압할 때는 환기를 매우 신중하게 고려해야 합니다. 화재의 열 방출 속도는 개구부가 만들어진 후에 항상 증가할 것입니다. 미국의 소방관들은 이 사실을 더 잘 알고 있습니다. 때문에 미국에서는 "도어맨(door man)"의 도입으로 이어졌습니다. 이 진압대원(도어맨)은 출입문이 가능한 항상 닫혀 있도록 출입문을 관리합니다. 이러한 방식을 적용하면 화재의 열 방출 속도가 제한될 수 있습니다.

2 Effectiveness of vent openings

또 다른 중요한 요소는 환기가 이루어지는 개구부의 크기에 관한 것입니다. 이 주제에 대해서는 많은 소방관련 문헌에 쓰여져 있습니다. 미국에서는 4 x 4ft(1.2m x 1.2m)의 배기구가 오랫동안 표준으로 간주되었습니다. 이것은 1.44 m²의 개구부 입니다. 최근에 이것이 더 이상 충분히 크지 않다는 것이 알려졌습니다. 요즘엔 가로 4ft, 세로 8ft 의 개구부가 배기구로 더 자주 사용됩니다. 이것의 크기는 2.88m² 입니다.

유럽에서 건물 지붕에 구멍을 만들어 배기구를 만드는 것은 흔한 일이 아닙니다. 유럽에서는 일반적으로 창문을 열거나 깨뜨리는 것으로 배기구를 만들어냅니다. 이러한 경우 배기구의 크기는 대부분 활용 가능한 창문의 크기에 따라 결정됩니다. 창문을 개방하는 것을 창문을 깨뜨리는 것보다 더 선호합니다. 열린 창문에 의해 원치 않는 환기 흐름이 발생하면 창문을 다시 닫아버리면 되기 때문입니다. 하지만 깨진 창문은 다시 닫을 수 없습니다.

급기구 및 배기구를 서로 특정 비율로 유지함으로써 가능한 한 가장 효율적인 환기(배연) 효율을 찾을 수 있습니다. 이는 가능한 한 가장 빠른 연기 배출 흐름이 급/배기구의 특정 비율을 통해 달성될 수 있음을 의미합니다.

이 이상적인 비율을 결정하려면 자연 환기와 양압 환기를 구별해야 합니다. 다음 단락은 하나의 개구부가 완전히 급기구로 사용되고 다른 개구부가 완전히 배기구로 사용되는 상황에 관한 것입니다. 수직 배연(vertical ventilation)이 대개 이런 경우입니다. 실제로 수평 배연(horizontal ventilation)은 좀더 복잡해집니다. 수평배연은 대부분의 경우 하나의 개구부가 두 방향(급기 및 배기)으로 사용됩니다. 또한 각각 모든 개구부에는 양방향의 흐름이 생깁니다. 이 특정한 현상을 단순화하는 것은 불가능합니다. 따라서 다음 단락에서 간단한 내용을 다루겠습니다.

2.1 Natural ventilation.

배연(환기)는 기본적으로 연기 덩어리를 화재실 내부에서 화재실 밖으로 배출하는 것을 의미합니다. 화재실을 진공 상태를 만드는 것은 불가능하기 때문에, 이 배출된 연기의 부피와 동일한 부피의 공기가 화재실로 유입되어야 합니다. 자연배연의 경우 부력에 의해 연기가 배출될 것입니다. 이러한 부력은 공기와 연기 사이의 밀도(~온도) 차이의 결과입니다. 환기가 제대로 되려면 건물 안으로 신선한 공기가 충분히 유입되어야 합니다. 연구에 따르면 자연배연은 급기구가 배기구의 두 배 크기인 경우 약 90%의 효율을 가지게 됩니다. 급기구가 배기구와 같은 크기일 경우 이 효율은 80%까지 감소하게 됩니다(그림 3 참조).

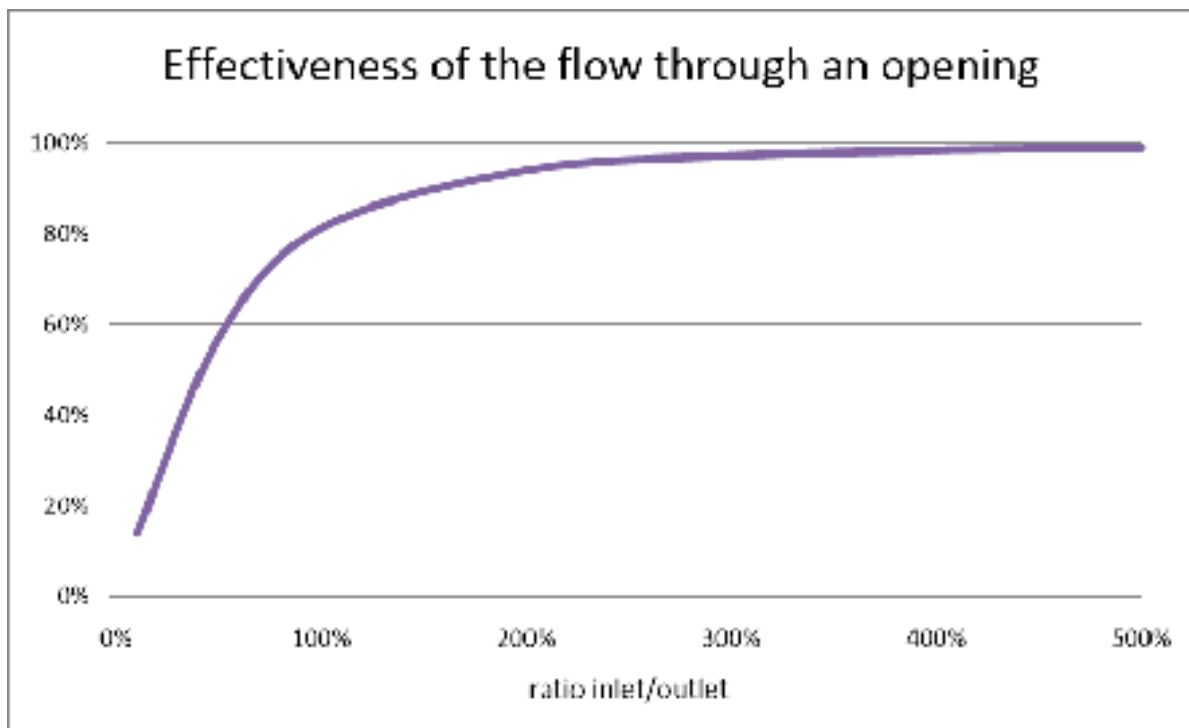


Figure 3 Flow effectiveness in relation to the proportion between the inlet and outlet for smoke with a temperature of 300 °C. When the inlet is twice the size of the outlet, the effectiveness becomes 94%. When the inlet is the same size as the outlet, effectiveness is reduced to 81%.

예시를 사용하면 상황을 더 깔끔하게 이해할 수 있습니다. 연기가 가득차 배연이 필요한 화재실에 2m²의 출입문 1개(폭 x 높이: 1 x 2m)와 1m²의 창문 4개가 있다고 가정해 보겠습니다. 화재 가스의 온도가 300°C 라고 가정하고 하나의 창문을 개방하여 배기구로 설정하고 출입문을 개방하여 급기구로 설정 할 경우 급기(구)/배기(구) 크기 비율이 2가 됩니다. 이는 배기구를 통해 94%의 효율(이론적인 최대 유량)을 만들어냅니다. 매초 2.67kg의 연기가 건물에서 배출됩니다. 두 번째 창문을 개방하면 급기/배기 크기 비율이 1로 떨어집니다. 각 개별 창문의 효과는 81%로 감소합니다. 하지만 총 배기구가 2개로 늘어났습니다. 이는 하나의 창문에서 얻을 수 있는 대한 최대 이론적 배연 효율의 1.61배에 달한다는 것을 의미합니다. 즉, 하나의 창문으로 0.94배의 효율을 얻을 수 있는 것보다 더 나은 방법입니다. 실제로 초당 4.81kg의 연기가 방출됩니다. 4개의 창이 모두 열리면 급기/배기 비율이 0.5로 떨어집니다. 각 창문의 효율은 57%입니다. 하지만 지금은 4개의 열린 창문이 있습니다. 이는 하나의 창문만 열었을 때보다 배기되는 (이론적인) 연기량의 2.28배를 달성한다는 것을 의미합니다. 이 예에서는 7.26kg/s의 연기가 배출 됩니다. 더 많은 창문이 열리면 창문 하나당 효율은 더 떨어집니다. 모든 배기구 크기를 더한 값이 급기구 크기의 3배라면 더이상 여분의 창문을 여는 것(배기구를 만드는 것)은 무의미해집니다.

요약하면 하나의 급기구와 또다른 하나의 배기구에 대한 급기(입구)/배기(출구) 크기 비율이 2/1 일 때 가장 높은 효율을 발생한다고 말할 수 있습니다. 더 많은 창문(배기구)을 개방하면 창문 하나당 효과는 낮아지지만 총 환기량은 더 높아집니다. 이 급기/배기 면적 비율 1/3 에 도달하면 더 이상 창을 열지 않아도 됩니다. 이것은 수직 통풍(vertical ventilation)에서만(급기구에서는 유입되는 흐름만, 배기구에서는 배출되는 흐름만 존재하는 단방향 공기 흐름에서만) 유효하다는 것을 명심해야 합니다. 출입문(급기구)은 연기층보다 완전히 아래에 있고 창문(배기구)은 중성대 보다 위에 존재하며 창문은 완전히 배기구로만 적용되는 경우입니다.

2.2 Positive pressure ventilation

양압 배연의 경우 최적의 흐름을 얻으려면 급기구와 배기구 사이의 비율이 서로 달라야 합니다. 그 비율은 자연 배연과 반대입니다. 즉, 최적의 흐름을 위해 배기구는 급기구 크기의 2배가 되어야 합니다. 위의 예에서 이것은 4개의 창문을 모두 열었을 때 최적의 효율을 달성함을 의미합니다. 그러면 배기(구)/급기(구)의 (총) 크기 비율이 2입니다. 이 흐름은 연기와 공기 사이의 온도 차이에 의해 만들어지는 것이 아닌 송풍기 에 의해 강제로 만들어집니다. 창문을 더 열어 배연의 효율을 높일 수 있습니다. 자연환기의 경우와 마찬가지로 3(배기구/급기구)보다 더 큰 비율을 목표로 하는 것은 무의미합니다.



Figure 4 Positioning of two positive pressure fans in V-formation. (Photo: Frank Meurisse)

3 Wind

위 단락에서는 주변 환경을 고려하지 않고 단일 개구부의 흐름 효과만을 검토했습니다. 하지만 실제로 이것은 화재 현장에서 적용할 수 있는 적절한 방법이 아닙니다. 개구부(급/배기구)가 만들어지기 전에 바람이 있는지, 어느 방향으로 불고 있는지를 진압대원은 확인해야 합니다.

자연 배연의 경우 바람이 큰 영향을 미칠 것으로 보입니다. 그러므로 항상 "바람 방향을 따라(with the wind)" 연기를 배출하려고 노력하는 것이 필수적입니다. 즉, 바람이 불어오는 쪽(풍상)에 급기구를 만들어야 합니다. 가급적 배기구는 반대쪽(풍하)에 만들어야 합니다. 심지어 배기구가 기울어진 지붕에서 만들어졌을 때도, 이 규칙을 따르는 것이 가장 좋습니다. 그렇게 할 수 없는 경우, 가능한 한 높은 환기 효율을 만들어 낼 수 있도록 개구부를 만들어야 합니다(위 참조).

양압 배연은 현장 상황이 바람에 덜 의존한다는 것을 의미합니다. 바람을 거슬러 배연하는 것은 제한된 방법만으로 시도될 수 있습니다. 이러한 상황에서는 배기구를 작게 만들어야 합니다. 이렇게 하면 화재실 내부의 과압이 증가됩니다. 풍속이 작을 경우, 이러한 방식은 바람의 압력을 극복하기에 충분할 수 있습니다. 이 방식은 풍하면(leeward side)에 배기구를 만들 수 없는 경우에 유용할 수 있습니다. 그러나 이 선택은 매우 제한적인 상황에서만 가능합니다. 조사에 따르면 소방차에 일반적으로 적재하는 PPV 송풍기는 26 Pascal(0.26mbar)이상의 과압을 만들어낼 수 있습니다. 이는 20km/h의 강풍에 의해 만들어지는 압력과 거의 같습니다. 바람의 방향과 반대로 환기하는 것은 매우 낮은 풍속에서만 가능할 것입니다. 몇몇 문헌에서는 10km/h의 임계치를 언급하고 있습니다. 이보다 낮은 풍속일 경우에만 바람을 거슬러 배연하는 것이 효과적일 것입니다. 이 풍속보다 빠르면, 배연 효율은 매우 빠르게 감소할 것입니다.

4 Bibliography

- [1] Lambert Karel, *New insights into ventilation, De brandweerman, May 2011*
- [2] Hartin Ed, www.cfbt-us.com
- [3] Kerber Steve, *Impact of ventilation on fire behavior in legacy and contemporary residential Construction, 2011*
- [4] Kerber Steve, *Analysis of changing residential fire dynamics and its implications on firefighter operational timeframes, Fire Technology, vol. 48, p 865-891, 2012*
- [5] Merci Bart, *Active fire protection II: smoke and heat control, postgraduate studies in fire safety engineering, Universiteit Gent, 2010*
- [6] Svensson Stefan, *Fire Ventilation, Swedish Rescue Services Agency, 2000*
- [7] Christian Gryspeert, *personal communication, 2014*
- [8] Kerber Steve, Madrzykowski Dan & Stroup David, *Evaluating positive pressure ventilation in large structures: high-rise pressure experiments, NISTIR 7412, Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2007*

Karel Lambert