

Taking a closer look at under ventilated fires

근래에 환기가 불량한 화재에 대한 연구가 증가하고 있습니다. 한편, 소방관들도 요즘 더 자주 화재 현장에서 환기가 불량한 화재를 직면하고 있습니다. 이러한 연구는 우리에게 환기가 불량한 화재의 행동에 대해 많은 것을 가르쳐 주고 있습니다. 이 글에서는 환기가 불량한 화재의 화재 행동에 대해 자세히 알아보겠습니다.

1 What is the difference between a ventilated and an under ventilated fire?

일반적인 연료 하중이 포함된 건물내부에서 화재가 시작되면, 어느 시점에서 화재는 환기 지배형 화재가 될 것입니다. 이는 화재 강도가 화재실로 유입될 수 있는 신선한 공기의 양에 따라 결정된다는 것을 의미합니다.

1.1 Ventilated fire progress

화재 발생 후 큰 창문이 열리면 화재 초기부터 많은 공기가 화재실로 유입될 것입니다. 이것은 화재가 쉽게 성장할 수 있게 해 줄 것입니다. 방해받지 않고 성장할 수 있는 격실 화재는 플래시오버로 진행될 것입니다. 플래시오버는 화재가 성장 단계에서 완전히 발달된 단계로 진행되고 있다는 것을 의미합니다. 화재가 완전히 발달된 단계에서는 격실 안의 모든 가연물이 연소하기 시작할 것입니다. 이는 신선한 공기의 필요성이 상당히 증가한다는 것을 의미합니다. 기존의 개구부(창문 및 문)는 더 이상 화재에 충분한 신선한 공기를 공급할 수 없습니다. 화재는 이미 환기 지배형 화재로 바뀌었습니다. 화재가 연료 지배형에서 환기 지배형으로 전환되는 순간을 FC/VC 지점이라고 합니다.

플래시오버 중에 공기공급이 양호한 화재를 환기가 양호한 화재라고 합니다. 화재 초기부터 충분한 공기가 공급(환기가 양호한 상태)되어야 화재가 플래시오버로 진행될 수 있습니다.

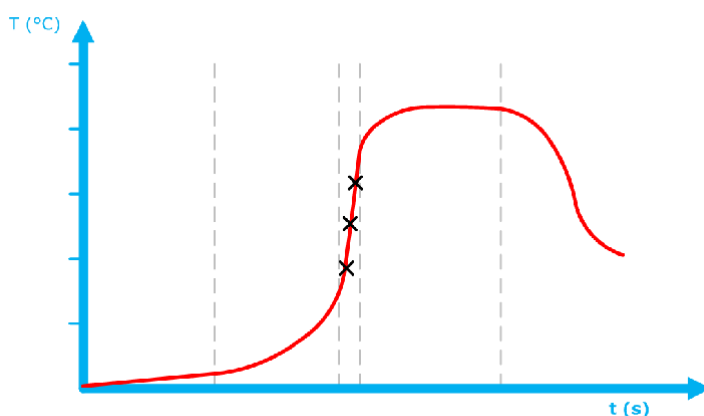


Figure 1 Possible locations of the FC/VC point in the ventilated fire. (Graph: Bart Noyens)

방향으로 진행할 것입니다. 그러므로 그들은 충분한 에너지가 화재의 성장 단계가 끝날 무렵의 방에서 방출되어야만 플래시오버로 진행될 수 있다고 말합니다. 각 'x'는 FC/VC

그림 1은 환기가 양호한 화재의 그래프입니다. 사실 우리는 이러한 형태의 화재에서 FC/VC 지점이 정확히 어디에 있는지 잘 모릅니다. 플래시오버 단계 중 어딘가에 있지만 정확히 어디에 있는지는 아무도 모릅니다. 일부 전문가들은 FC/VC 지점이 플래시오버가 시작되기 약간 전에 위치할 수도 있다고 말하기도 합니다. 그들은 화재의 성장을 바다에 떠 있는 배에 비교하기도 합니다. 운항하던 배가 엔진을 멈추면, 배는 잠시 동안만 타력 (rudder force)으로 기존의 운항

지점의 가능한 위치를 나타냅니다. 환기가 양호한 화재의 경우 FC/VC 지점이 정확히 어디에 있는지는 중요하지 않습니다. 하지만 진압대원들이 성장단계의 화재와 완전히 발달된 화재를 구별할 수 있는 것은 중요합니다. 그 이유는 각 단계의 화재는 다른 진압 전술을 필요로 하기 때문입니다. 그 외에도 소방관들이 임박한 플래시오버의 징후를 찾아낼 수 있는 능력이 매우 중요합니다.

- 연기층 상부에서 나오는 강한 열
- 연기층에서 보이는 춤추는 불꽃(Dancing angels in the smoke layer), 롤오버의 시작
- 연기층(중성대)의 빠른 하강 또는 이미 낮아진 상태
- 난류(turbulent)로 변하는 연기층(swirling motion)
- 격실 내부 가연물의 갑작스런 열분해

1.2 Under ventilated fire progress

환기가 불량한 화재의 경우 FC/VC 지점의 위치가 매우 중요합니다. 환기가 불량한 화재에서 이 지점은 플래시오버 이전에 위치해 있습니다. 이런 종류의 화재는 플래시오버로 성장하기에 충분한 공기를 가지고 있지 않습니다. 화재는 환기가 양호한 화재 그래프를 따르기를 원하지만, 공기가 충분하지 않기 때문에 더 높은 열 방출율을 가질 수 없습니다. 우리는 이것을 보수 공사가 진행 중인 고속도로 공사구간으로 비교할 수 있습니다. 이 공사구간에서는 차량의 제한 속도가 70km/h 로 낮아집니다. 운전자들은 이 표지판을 보는 즉시, 120km/h 에서 70km/h 로 속도를 늦출 것입니다. 운전자들은 더 빨리 가고 싶어 하지만(더 많은 에너지를 생산하고 싶지만 그럴 수 없는 화재처럼) 표지판은 그들의 속도를 제한하고 있습니다. 더 높은 열 방출률로 나아가길 원하지만, 공기의 부족으로 인해 이것은 불가능해질 것입니다.



Figure 2 The speed limit of 70 km/h at highways under construction is a good analogy for an under ventilated fire. The fire wants to burn harder but can't because of a lack of air.

화재실의 크기와 해당 화재실의 환기 여부는 언제 화재가 연료 지배형에서 환기 지배형으로 전환되는지를 결정합니다. 그림 3 은 여러 가지 다른 환기가 불량한 화재(녹색, 분홍색, 노란색)와 환기가 양호한 화재(적색)의 성상을 보여주고 있습니다. 이 화재들 사이의 차이점은 각각의 화재는 이전의 화재보다(녹-분-노-적색 순) 조금 더 늦은 시점에서 환기 지배형 화재로 전환 된다는 것입니다. "녹색" 화재는 가장 먼저 환기 지배형으로 전환되는 반면, "노란색" 화재는 화재실 내부에 사용 가능한 공기가 조금 더 있는 상황을 나타냅니다. 이 화재는 환기 지배형으로 되기 전까지 약 1 분 동안 연료 지배형 상태를 (녹색보다) 더 유지할 것입니다. 위에서 "x"는 각 화재에 대한 FC/VC 지점을 나타낸다고 이야기하였습니다. 자, 어떤 종류의 화재가 가장 위험할까요?

분명한 대답은 노란색 그래프가 보여주는 화재입니다. 이 화재는 환기가 불량한 화재중에서 가장 마지막에 연료 지배형에서 환기 지배형으로 전환되는 마지막 화재입니다. 즉, FC/VC 지점에서 실내 온도가 다른 두 화재에 비해 가장 높은 화재 입니다.

화재실 온도가 매우 낮으면 진압대원들의 위험성도 낮아집니다. 녹색선의 온도가 200°C 를 넘지 않았다고 가정하면 열분해 가스는 많지 않을 것입니다. 화재실의 온도는 가연물의

열분해가 시작될 만큼 뜨겁지는 않습니다. 물체가 열분해되기 시작하는 온도는 물체를 구성하는 물질의 종류에 따라 크게 달라집니다. 일반적으로(rule of thumb) 300°C 이상부터 많은 열분해 가스가 존재할 것입니다. 화점(화염)에 가까이 있는 가연물들은 더 빠르게 가열될 것입니다. 이것은 화염에서 나오는 복사열 때문입니다.

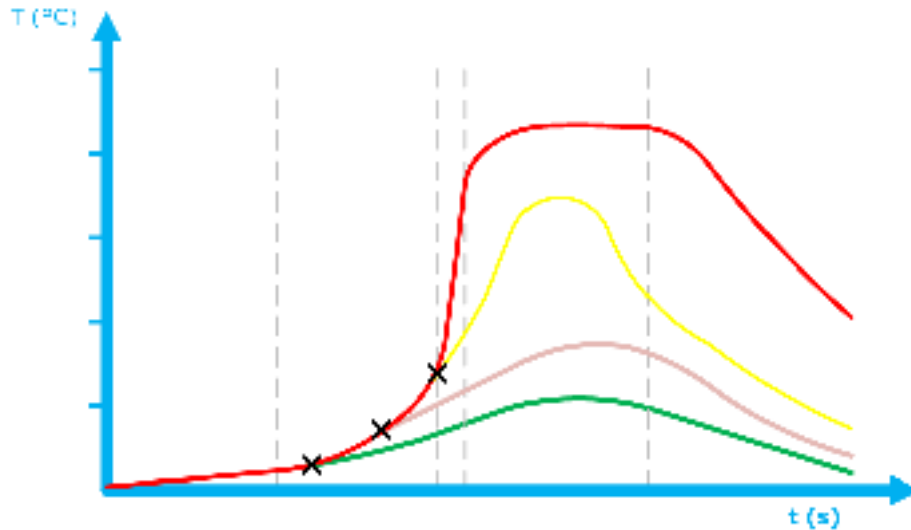


Figure 3 The red line illustrates the ventilated fire progress. The three other lines depict three different under ventilated fires. The green line represents a fire in a heavily insulated and air tight building. This causes the fire to become ventilation controlled early on. The pink line is a fire that has a little more air available. The yellow one is a fire that becomes ventilation limited just before flashover. (Graph: Bart Noyens)

실내 온도가 충분히 높아지고 연기층이 형성되어야만 화점에서 더 멀리 떨어진 물체들이 열분해되기 시작할 것입니다. 복사열은 주로 연기층으로부터 발생할 것입니다. 연기층에 둘러싸인 물체도 대류로 인해 뜨거워지기 시작할 것입니다.

따라서 화재 성상 그래프에서 FC/VC 지점의 위치는 매우 중요합니다. 화재가 환기 지배형으로 전환되는 순간에 화재실의 온도가 높아지면 높아질수록 화재는 더 위험해집니다.

화재로 인한 위험도는 경과된 시간에 따라 달라집니다. 어떠한 종류의 화재이던간에 화재가 발생하면 에너지(power, $W=J/s$)가 발생합니다. 이를 열 방출률(HRR)이라고 합니다. 이는 매초 일정량의 에너지가 생성된다는 것을 의미합니다. 하지만, 에너지는 또한 손실됩니다. 밀폐된 격실에서는 보통 벽을 통한 전도 때문에 에너지가 손실됩니다. 이것은 기본적으로 일정량의 에너지가 격실을 빠져나간다는 것을 의미합니다. 격실 화재는 에너지를 발생시키면서 동시에 벽을 통해 에너지를 잃습니다. 연료 지배형 화재에서는 화재에 의해 발생하는 열 방출 속도가 증가합니다. 이 HRR은 벽을 통해 빠져나가는 HRR보다 더 클 것입니다.

생성된 에너지(W)가 손실된 에너지보다 더 많으면 실내 온도가 상승합니다. FC/VC 지점 직후에는 온도가 잠시동안 좀 더 상승할 것입니다. 화재의 HRR은 정체되거나 심지어

감소할 수도 있습니다. 그러나 벽을 통해 손실된 HRR 이 화재에 의해 생성된 HRR 을 초과할 때까지 몇 초가 걸릴 것입니다. 생산되는 에너지보다 더 많은 에너지가 손실되는 순간, 온도가 내려가기 시작할 것입니다. 운항하는 배의 비유 역시 문제를 설명하는 데 도움이 될 수 있습니다. 선박의 엔진을 정지하였을지 모르지만, 그럼에도 불구하고 배는 꽤 오랫동안 앞으로 계속 이동할 것입니다. 화재의 HRR 은 정체되거나 감소하였지만 온도는 계속 상승합니다. 생산된 에너지가 제한됨에도 불구하고 손실된 열보다 더 많은 열이 여전히 발생하고 있기 때문입니다.

에너지가 손실되는 속도는 실내 온도, 외부 온도, 벽의 온도에 따라 달라집니다. 이와는 별도로, 건축 자재의 물리적 특성(열 전도도, 밀도 및 특정 열 용량)도 에너지가 손실되는 속도에 중요한 역할을 합니다. 벽의 다양한 재질(예: 마른 벽, 벽돌, 단열재)의 두께도 중요합니다.

여기서 중요한 질문은 "진압대원들은 언제 화재실의 문을 열까요?"입니다. 진압대원들이 문을 여는 순간 신선한 공기가 밀려들어가고 연기가 흘러나옵니다. 그 신선한 공기는 화재의 HRR 을 증가시킬 수 있습니다. 신선한 공기가 빠르게 유입될수록 화재는 더 위험해 집니다.

그림 3 을 다시 보면 화재 현장에서 타이밍이 매우 중요하다는 것을 알 수 있습니다. 진압대원들이 노란색 그래프의 화재에서 온도가 가장 높은 지점에서 문을 열면 핑크색 화재의 가장 높은 지점에서 문을 열 때보다 위험정도가 훨씬 클 것입니다. 다만 노란색 화재는 시간이 흐를수록 온도가 비교적 빠르게 내려갈 것입니다. 이 노란색 화재를 아무도 알아차리거나 보고되지 않은 상태에서 FC/VC 지점을 지난 후 1 시간 이후에 진압대원들이 문을 연다고 가정하면, 화재는 저절로 꺼졌을 것입니다. 일반적으로 내부 온도는 그다지 높지 않고 공기 흐름(air track)의 속도도 빠르지 않을 것입니다. 이제 분홍색 화재의 가장 높은 온도의 지점, 노란색 화재의 열을 모두 잃은 지점보다 더 위험한 상황이라는 것이 분명해졌습니다.

위험성을 평가하려면 다음 두 가지를 고려해야 합니다.

- 그 화재는 환기 지배형 상태인가?(지금 내부 온도가 얼마나 뜨거운가?).
- 진압대원들이 문을 열었을 때 화재실은 얼마나 뜨거운가?

2 Pressure

환기가 불량한 화재 중에는 화재실 내부에 독특한 압력 패턴이 나타날 수도 있습니다. 화재는 온도를 상승시킬 것입니다. 연기는 주변 온도보다 훨씬 더 뜨겁습니다. 뜨거워진 연기는 팽창하려 할 것입니다. 출입문이 열려 있는 방에서 화재가 발생한다면 연기가 밖으로 흘러나올 것입니다. 이것은 상승하는 실내온도를 부분적으로 감소시킬(compensate) 것입니다. 대부분의 출입문의 크기는 약 2m² 정도이기 때문에, 출입문이 열려진 상태에서의 화재는 내부 압력을 증가시킬 수 없을 것입니다.

문과 창문이 닫힌 상태를 유지하면 다른 압력 패턴들이 보여집니다. 화재실은 점차 연기로 가득 찰 것입니다. 화재실 내부의 온도가 상승할 것이고 그러면 내부 압력도 상승할 것입니다. 화재에 충분한 공기가 공급되면, HRR은 증가할 것입니다. 따라서 실내 온도도 상승할 것입니다. 그러면 내부의 산소가 고갈되기 시작할 것이고 어느 시점에 화재는 위에서 설명한 대로 FC/VC 지점에 도달할 것입니다. HRR은 감소하는 반면 벽을 통한 에너지 손실은 비교적 동일하게 유지될 것입니다. 실내 온도는 최고치에 도달한 후 높은 에너지 손실로 인해 빠르게 감소할 것입니다.

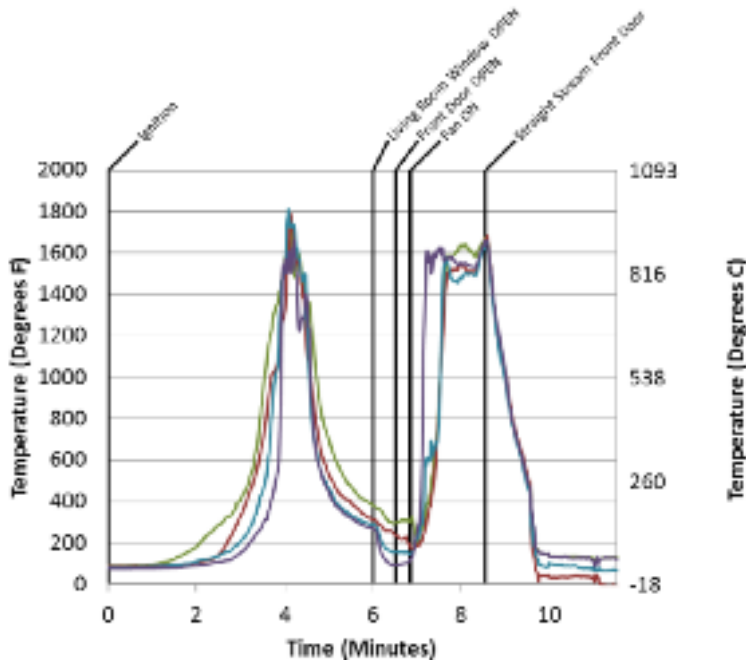


Figure 4 Temperature graph of one of the UL tests. The temperatures shown are those measured inside a living room where the seat of the fire was located. The different colors indicate different heights of measurement: Green: 2.1 m; Red: 1.5 m; Blue: 0.9m; Purple: 0.3m. It's clear that the temperature rises at first and then drops down again. (© Figure: UL FSRI)

2015년 1월, 저(Karel Lambert)는 시카고에 있는 Underwriters Laboratory's Firefight Safety Research Institute(UFRSRI)에서 주관하는 새로운 연구에 참가하였습니다.

UL은 수년 전부터 화재진압과 관련한 많은 수의 연구를 수행하고 있습니다. 매년 그들은 큰 시험 시설에 두 채의 집을 짓습니다. 그런 다음 이 집들에서 여러 번 실화재 실험연구를 실시합니다. 이 연구의 목표는 안전하고 반복 가능한 조건에서 새로운 화재 진압 전술을 찾아내는 것입니다.

1월 연구의 목적은 PPA (Positive Pressure Attack)의 효율성을 평가하는 것이었습니다. 이는 내부공격 전에

먼저 양압 환기(PPV, Positive Pressure Ventilation)를 사용하는 것을 의미합니다.

그림 4는 위에서 설명한 내용을 보여줍니다. 화재는 화재실의 온도를 상승시킵니다. 화재실내에서 산소를 모두 소비하면 화재는 FC/VC 지점을 지날 것입니다. FC/VC 지점을 지나면 온도가 급격하게 떨어집니다. 초기 점화 후에 화재는 성장 단계를 지나게 됩니다. 점화 후 약 1.5min 후에 뜨거운 연기층이 스스로 형성되는 것을 볼 수 있습니다. 녹색 선은 바닥에서 높이 2.1m 부근의 온도를 나타냅니다. 약 2.5min 후, 바닥에서 1.5m의 높이에서 온도가 상승하기 시작합니다(적색 선). 이것은 연기층이 상부에서 바닥에서 1.5m 높이까지 아래로 하강하였다(연기의 생산량이 증가하였다)는 것을 의미합니다. 점화 시작 후 4min 이내에 온도가 약 200 °C(400 °F, 바닥부근)에서 982 °C (1,800 °F, 천장부근)까지 상승합니다. 그러나 1min 후 온도가 다시 200°C(400°F, 화재실 전체)까지 내려갔습니다. 온도가 내려가는 속도는 단열의 정도와 사용된 건축 재료의 특성에 의해 영향을 받습니다.

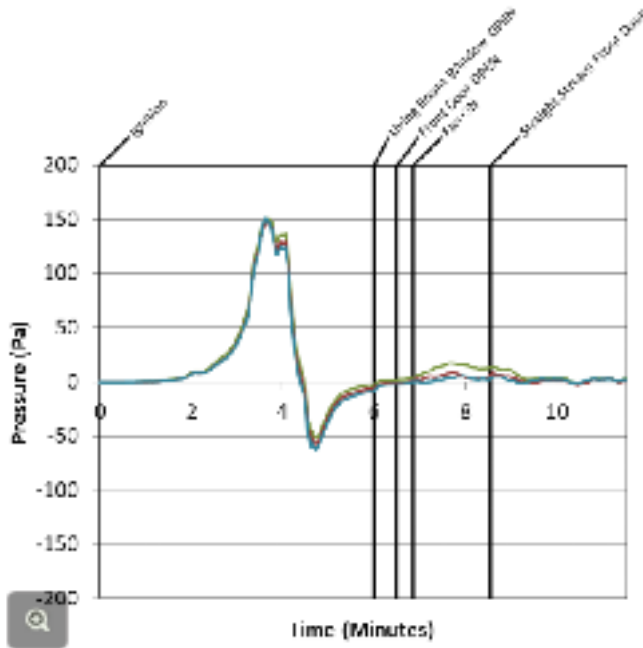


Figure 5 The change in pressure of the test. It is clear that the increase in pressure is tied to the rise in temperature. Once the peak temperature has been reached, the pressure starts to go down. (© Figure: UL FSRI)

온도가 내려가면 연기도 식을 것입니다. 하지만 화재실 내부는 과압 상태이기 때문에, 연기는 계속 밖으로 밀려나올 것입니다. 이것은 자전거 타이어가 서서히 바람이 빠지는 것과 같이 내부의 과압을 서서히 감소시킬 것입니다.

가열된 가스는 팽창할 것이고 냉각된 가스는 수축할 것입니다. 가스가 수축할 때, 과압은 훨씬 더 줄어들 것입니다. 때문에 가스는 냉각될 때 더 적은 부피를 가질 것입니다. 연기가 일부 누출되었기 때문에 화재실내에 남은 식어가는 가스는 더 이상 실내 전체를 채우지 못할 것입니다. 냉각은 실내의 압력을 낮추게 합니다. 이 실험에서는 (화재발생 4min 이 지난 후, 실내온도가 최고점을 지나고, 가스가 냉각되어 실내 압력이 감소되어) 50Pa 의 값으로 측정되었습니다. 다음으로 내부 압력이 외부 압력과 일치할 때까지 동일한 균열을 통해 외부 공기가 유입될 것입니다.

그림 4 를 그림 5 와 같이 살펴보면 두 현상이 서로 연결되어 있음을 쉽게 알 수 있습니다. 압력은 온도가 상승하는 동안만 증가합니다. 그 실험의 영상은 연기가 모든 틈새로 빠져나가는 것을 보여주었습니다. FC/VC 지점을 통과하면(화재가 연료 지배형에서 환기 지배형으로 바뀌면) 온도가 내려가기 시작합니다. 동시에 압력도 함께 떨어지기 시작합니다. 영상에서는 바깥으로 누출되는 연기가 갑자기 멈추는 것을 보여줍니다. 내부로 유입되는 신선한 공기의 흐름은 육안으로 볼 수 없습니다.

마지막으로, 위의 그래프는 단일 실험 결과를 기술한 것임을 유의해야 합니다. 다른 실험에서는 다른 압력 패턴이 나타났습니다. 압력 및 온도 변화는 다양한 요소에 따라 달라집니다. 그러므로 다른 실화재 실험에서의 그래프는 위에서 설명한 그래프와 완전히 다르게 보일 수 있습니다.

화재 발생 후 처음 4min 동안은 실내의 압력이 증가할 것입니다. 그림 5 는 압력 변화의 패턴을 보여줍니다. 화재실 내부의 과압은 150Pa 에 다릅니다. 이는 15kg/m²의 압력 (1m²의 면적에 15kg 의 무게가 누르는 힘)과 거의 같습니다. 실내에 2m²의 표면적을 가진 출입문이 있는 경우 뜨거운 연기가 출입문에 약 30kg 의 무게가 만들어내는 힘으로 누를 것입니다. 해외에서도 화재실 내 고압으로 문을 열지 못해 주민들이 집을 빠져나오지 못한 사례가 기록되어 있습니다. 또한 과압으로 인해 연기가 갈라진 틈으로 밀려나올 것입니다.

이 누출되는 연기 때문에 압력 형성은 제한적으로만 유지될 것입니다.

화재실의 온도가 최고점에 이르자마자 연기의 팽창이 중단됩니다. 연기가 더 이상 가열되지 않고 있습니다. 실내

3 Arrival of the fire service

이제 우리는 스스로에게 물어야 합니다. "우리가 어떻게 화재 현장에서 위의 지식을 사용할 수 있을까요?"



Figure 6 Smoke is flowing out a window. By looking at the color, flow velocity, ... one can determine the severity of the situation. (© Photo: Warre St-Germain)

필요한 충분한 환기가 이루어지지 않습니다. 물론 이것은 올바른 맥락에서 고려될 필요가 있습니다. 현대의 주택에서는, 격실의 크기가 작은 편이고 화재는 건물의 창문을 깨뜨리거나 건물에 구멍을 뚫지 못할 가능성이 가장 높습니다. 공격대원들은 내부로 진입할 때까지 환기 프로필이 변하지 않을 것이라고 추정할 수 있습니다. 그러나, 격실의 크기가 큰 공장 또는 창고에서는, 환기 지배형으로 전환되기 전에 화재가 크게 성장할 가능성이 있습니다. 즉, 큰 창고에서 발생한 화재는 매우 많은 양의 공기를 이용할 수 있습니다. 그 외에도 벽(창문 등)이나 지붕(채광창 등)의 플라스틱 구성 요소가 녹을 가능성이 있습니다. 이렇게 하면 환기가 가능한 개구부가 만들어집니다.

그러나 건물의 크기를 고려하면서 벽과 지붕의 개구부를 보고 화재가 환기가 양호한지 또는 환기가 불량한지를 평가하는 것은 가능할 것입니다.

3.1 Under ventilated fire shortly after the FC/VC point

개구부가 없을 때는 연기가 건물의 틈에서 뿜어져 나오는 것을 볼 필요가 있습니다. 위에서 우리는 격실 화재가 성장하면서 압력을 증가시킨다는 것을 설명했습니다. 양압으로 인해 연기가 균열과 틈새를 통해 누출되게 됩니다. 압력이 높을수록 연기가 더 많이 배출되고 더 빨리 흐르게 될 것입니다.

연기가 밖으로 밀려나올 때, 화재실내에는 큰 과압이 형성되어 있을 것입니다. 이것은 내부 환경이 높은 온도에 도달했다는 것을 의미합니다. 이때 공격대원들이 출입문을 열고 내부로 진입하면 급격한 연기와 공기의 흐름이 만들어 질 것입니다. 연기가 심하게 밀려나오고

화재 현장에 도착하자마자, 모든 소방관들은 화재가 발생한 건물 안에서 무슨 일이 일어나고 있는지 알아내기 위해 노력해야 합니다. 특히 현장지휘관들(최고 지휘관, 단위지휘관, 등)과 최고 책임자들은 화재상황에 대한 정확한 그림을 머리속에 그릴 필요가 있습니다. 환기가 되고있는 개구부의 크기, 위치를 살펴봄으로써, 소방관들은 그들이 환기가 양호한 화재에 직면했는지 아니면 환기가 불량한 화재에 직면했는지 판단하려고 시도할 수 있습니다. 문 또는 창문이 열려 있고 연기가 흘러나오고 있다면, 화재는 환기가 양호한 상태일 가능성이 높습니다.

하지만 소방관들이 완전히 밀폐된 건물에서 발생한 화재현장에 도착했다면 상황은 달라집니다. 모든 창문과 문이 닫혀 있으면, 화재는 완전히 성장되기에



Figure 7 During this under ventilated fire, temperature inside is running very high. The overpressure inside will push smoke out. (© Photo: Zbigniew Wozniak)

공기가 급격하게 유입될 것입니다. 전형적으로, 공기의 터널이 만들어 집니다. 출입문의 더 많은 부분이 연기를 배출하는 데 사용되며 출입문의 아랫부분에서는 급격하게 유입되는 공기의 터널이 만들어 집니다. 그러나 이 상황은 오래 지속되지 않을 것입니다. 개방된 개구부의 면적이 크기 때문에 화재실내의 과압이 감소할 것입니다. 내부로 여전히 공기가 유입되고 외부로는 뜨거운 연기가 유출될 것입니다. 하지만 이 상황은 빠르게 진행될 것입니다. 환기 유도 플래시 오버가 뒤따를

가능성이 높습니다. 드문 경우이긴 하지만, 심지어 백드래프트도 발생할 수 있습니다.

우리는 위에서 설명한 상황을 화재 현장에서 명확하게 인지할 수 있습니다. 진압대원들이 환기가 불량한 화재의 성장과 열과 압력의 축적에 대해 교육을 받았다면 무슨 일이 일어나고 있는지 이해할 수 있을 것입니다. 출입문이 열릴 때 발생하는 현상은 "공사 중인 고속도로"의 비유를 사용하여 다시 설명할 수 있습니다. 공사구간에 진입하기 전에 운전자들은 70 km/h의 속도로 감속해야 합니다. 하지만, 대부분의 운전자들은 서두르고 있고 가능한 한 빨리 120 km/h로 돌아가고 싶어합니다. 이들은 공사 중인 구간을 벗어나자마자 더 이상 속도 제한이 적용되지 않음을 나타내는 표지판을 확인할 것입니다. 모든 운전자는 다시 120 km/h의 속도가 될 때까지 가속할 것입니다. 위에서 설명한 것과 같이 화재는 필요한 공기를 얻으면 빠르게 성장할 것입니다. 화재는 현재 출입문을 통해 유입되는 공기의 양으로 달성할 수 있는 최대 HRR을 만들기위해 "가속"될 것입니다.

3.2 Under ventilated fire in underpressure

위에서는 환기가 불량한 화재가 어떻게 스스로 질식(suffocate)할 수 있는지 설명했습니다. 화재가 진행됨에 따라 실내 온도와 압력이 모두 감소하면 외부로 누출되는 연기는 멈출 것이지만, 그 연기는 약간의 흔적을 남길 것입니다. 창문과 문 주위에는 그을음 자국이 보일 것입니다. 이러한 그을음 얼룩은 '내부에서 화재가 발생했거나 아직도 진행중에 있다는 유일한 가시적 징후'일 수 있습니다. 화재실의 압력이 감소하는 단계에 이르렀는지, 아니면 화재가 완전히 소멸하였는지는 외부에서는 정확히 알 수 없습니다.



Figure 8 At the end of the construction site, the speed limit is lifted. A fire has a limited HRR because of a lack of air. As soon as a door is opened, that restriction is lifted as well and the fire will progress into a ventilation induced flashover. (Photo: shutterstock)

만약 진압대원들이 야간에 화재 현장에 도착한다면, 이런 종류의 징후들은 쉽게 놓칠 수 있을 것입니다. 야간에는 맨눈으로 볼 수 있는 연기가 없을 수도 있습니다. 따라서, 볼 수 있는 것이 없다는 사실로부터 어떤 결론도 내리면 안된다는 것을 알아야 합니다. 미국의 Ed Hartin 은 다음과 같은 말을 하였습니다. "아무것도 보여주지 않는다는 것은 정확히 그것을 의미하는 것은 아무것도 없다는 것이다." 진압대원들이 화재현장에 도착한 후 외부에서 아무것도 보이지 않는 경우엔 대부분 아무 일도 일어나지 않았다는 것입니다. 하지만, 이것은 일상적이고 안일한 태도로 이어질 수 있습니다. 문이 열려 있어야만 무슨 일이 있는 것인지 아닌지를 우리는 확실하게 알 수 있습니다.

화재실의 압력이 음압인 단계(negative stage)일 때 출입문을 열면 연기가 외부로 빠져나가지 않고, 화재실 내부로 유입되는 공기의 흐름만이 빠르게 요동칠 것입니다. 그 내부로 유입되는 흐름은 너무 강해서 문을 다시 닫는 것이 불가능할 수도 있습니다. 이 같은 흐름은 내부에서 거센 화염이 타오르고 있음을 보여줍니다. 그림 4 와 5 에서 화재발생 4min 후 약 200 °C 의 내부 온도를 나타낼 때 당시의 내부 압력은 50 Pa 입니다. 만약 진압대원들이 그러한 조건에서 문을 개방하게 된다면, 환기 유도 플래시오버는 상당히 짧은 시간(2 ~ 4min) 내에 발생할 것입니다.

이것은 소방관들이 익숙한 시나리오로 화재 성장, 격실의 개구부, 온도 및 압력 사이의 관계를 이해하면 쉽게 설명할 수 있습니다. 지휘관들은 현장에서 무슨 일이 일어나고 있는지 알 수 있도록 이러한 징후들을 인식하는 것이 중요합니다. 그렇게 함으로써 지휘관들은 그들의 전략을 적절히 조정하고 화재를 안전하고 효과적으로 진압할 수 있을 것입니다.

3.3 Under ventilated fire long after the FC/VC point

또다른 가능성은 불이 꺼진 지 오래된 화재 현장일 수도 있습니다. 그림 3 은 환기가 불량한 세 가지 화재의 형태를 보여줍니다. 노란색 선은 그림 4 의 그래프와 일치하는 화재를 나타냅니다. 산소 부족의 영향이 미치기 전에 온도가 크게 상승할 것입니다. 이후 온도는 빠르게 낮아지는 것이 뚜렷하게 보입니다. 현대 주택에서는 창문이 고장날 가능성이 매우 낮습니다. 따라서 화재실은 더이상의 공기유입과 연기배출은 없는 상태로 유지될 것입니다. 시간이 지나면 산소 부족으로 불이 꺼질 것이고 뜨거운 연기는 뜨거운 공기와 마찬가지로 열에너지를 벽으로 전달할 것입니다. 그리고 잠시 후, 온도는 다시 화재 발생 이전의 수준에 도달할 것입니다.

이런 상황에서 진압대원들이 출입문을 열면 내부로 유입되는 공기의 흐름은 거의 만들어지지 않을 것입니다. 외부 환경과 내부 환경과의 압력 차이가 거의 없을 것입니다. 그 외에도, 내부 연기와 외부 공기의 온도 차이는 거의 없습니다. 최종적으로 만들어지는 어떠한 흐름도 매우 느린 속도의 흐름이 만들어질 것입니다. 이것은 진압대원들이 다시 주목해야 할 매우 중요한 시나리오 입니다. TIC 를 통해서도 화재실 내부의 온도 상승을 거의 확인할 수 없을 것입니다. 화재가 완전히 소멸되면 그 온도는 그대로 유지될 것입니다. 따라서 TIC 는 환기가 불량한 화재가 진행중인 화재실로 진입할 때 매우 유용한 도구입니다. 아직 화점이 남아 있고 HRR 이 증가할 경우, TIC 는 진압들이 방화복 통해 온도 상승을 느끼기 전에 이를 인지할 수 있도록 할 것입니다.

4 Bibliography

- [1] *Study of the Effectiveness of Fire Service Positive Pressure Ventilation During Fire Attack in Single Family Homes Incorporating Modern Construction Practices, UL FSRI, resultaten verwacht in 2016*
- [2] *Impact of ventilation on fire behavior in legacy and contemporary residential Construction, Kerber Steve, 2011*
- [3] *Ventilating today's residential fires, Kerber Stephen, presentatie op FDIC, 2011*
- [4] *Fire dynamics: Technical approach, tactical application, Lambert Karel & Baaij Siemco, 2015*
- [5] *Scientific research for the development of more effective tactics, UL FSRI, Fire Department New York & NIST, 2012*