The fire growth curve revisited

1 Introduction

모든 소방관들은 소방관 기본과정에서 배우는 화재 성장곡선을 잘 알고 있습니다. 과거에는 화재 성장곡선이 딱 하나만 존재했지만 지금은 두 개의 곡선이 존재합니다. 그 하나는 "환기가 양호한 화재*(ventilated fire)*"라는 용어로 정의된 오래된 화재 성장곡선입니다(그림 1 참조). 이 글은 이 곡선에 대해 논할 것입니다. 이는 다음과 같은 조건에서 실내에서 발생한 화재를 나타냅니다.

- 구획실내의 적절한 위치에 분포한 충분한 화재 하중
- 충분한 환기

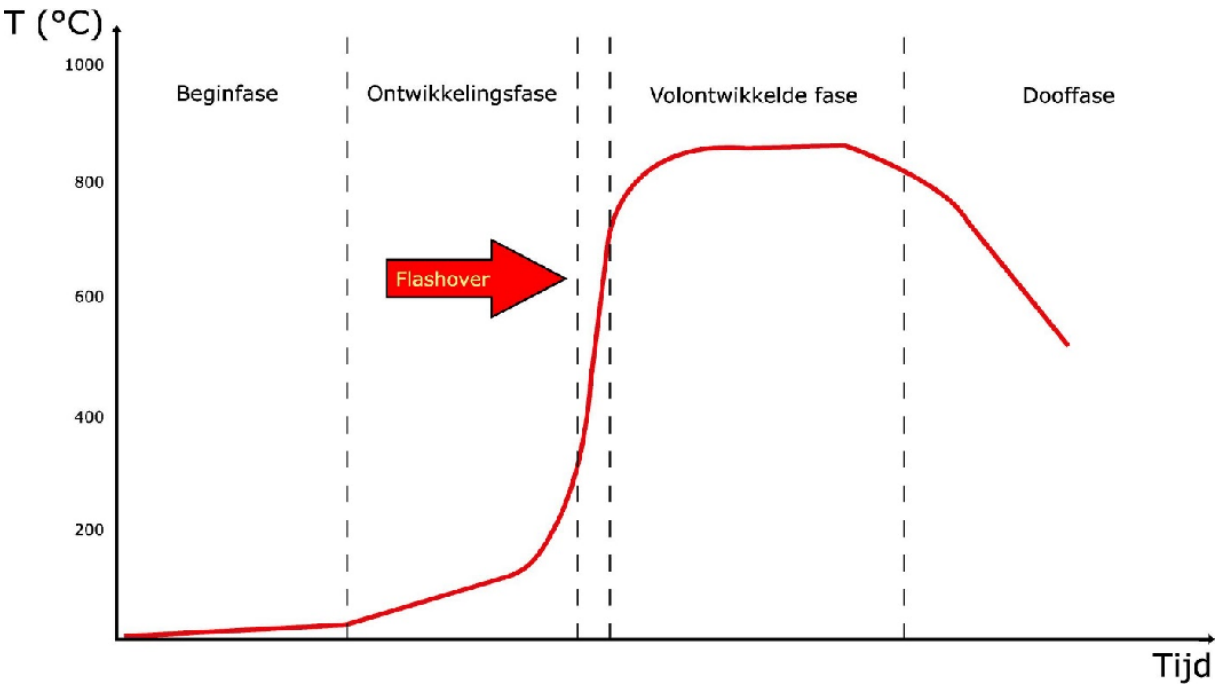

figure 1 The ventilated fire growth curve *(figure: Karel Lambert)*

화재 발생 초기(발화기)에는 화점 근처에 있는 다른 인화성 물체를 점화하기에 충분한 높은 열 방출 속도를 낼 수 없기 때문에 화재가 저절로 소멸하는 경우가 종종 있습니다. 이러한 경우에는 연기가 발생하지만 열은 거의 발생하지 않습니다. 따라서 화재가 플래시오버로 진행될 수 있는 충분한 연료 하중이 있지만 연소 물질(fuel package)의 적절하지 않은 배치로 인해 이러한 일이 발생하지 않습니다. 그러면 화재는 초기 단계에서 자동으로 꺼집니다(소멸됩니다).

최근, Oostkamp 소방서에서 이러한 화재가 발생하였습니다. Oostkamp 소방대원들은 온 가족이 건물 1 층에 고립되어있는 주택 화재 현장으로 출동했습니다. 출동대가 현장에 도착하여 상황파악(size up)을 실시하였을때, 1 층 전체가 연기로 가득 찬 것으로 확인되었습니다. 연기가 1 층에 있던 거주자들의 탈출로를 막고 있었습니다. 게다가, 1 층의

창문은 모두 단일 유리창으로 되어 있었습니다. 화재는 환기가 불량한 상태로 보였고 소방대원들은 창문을 깨는 것이 환기를 유도하여 플래시오버를 유발할 수 있다는 판단을 하였습니다. 내부 공격은 45mm 관창을 사용하여 시작되었습니다. 공격대원들이 내부로 전진하는 동안, 거실의 연기가 전혀 따뜻하지 않은 것을 확인하였습니다. 차가운 연기는 환기가 불량한 화재에서 자주 나타나는 현상입니다. 공기가 부족하기 때문에 화재의 열 방출량(HRR: Heat Release Rate)은 매우 낮았습니다(그림 2 참조). 이것은 열이 거의 축적되지 않았다는 것을 의미합니다. 열화상카메라를 사용하여, 대원들은 화점을 찾을 수 있었습니다. 그 화점은 충전된 채로 방치된 호버보드였습니다. 호버보드는 단단한 오크나무로 만들어진 캐비닛 옆에 위치해 있었습니다. 캐비닛은 물론 검게 그을렸지만, 불타는 호버보드의 HRR 은 나무 캐비닛을 완전히 불붙이기에 충분하지 않았습니다. 호버보드는 완전히 타버렸고 화재는 소멸 단계에 접어들었습니다. 화재로부터 많은 양의 연기가 발생했지만 열은 거의 발생하지 않았습니다. 송풍기를 사용하여 건물에서 연기를 배출한 후 그 가족들은 곤경에서 벗어날 수 있었습니다. 연기가 따뜻하지 않았음에도 불구하고, 독성은 충분히 높아서 거주자들이 호흡 장치 없이 연기를 통과하여 도망치는 것은 불가능하였습니다.

하지만 이 시나리오는 완전히 다르게 나타날 수도 있었습니다. 거실 반대편에는 보통 호버보드가 보관되어 있던 종이 상자가 있었습니다. 이 종이 상자는 커다란 3 인용 소파 옆에 있었습니다. 호버보드가 상자 안이나 위에 놓여 있다가 불이 붙었다고 가정해 보겠습니다. 십중팔구 소파에도 불이 붙었을 것입니다. 그 소파는 거실에 플래시오버를 일으키기에 충분한 HRR 을 만들어냈을 것입니다. 이 시나리오에서 소방대원들은 현장에 도착하자마자 1 층에서 완전히 성장한 대형 화재에 직면했을 것입니다. 그러한 화재로부터 발생되는 연기의 온도는 10 배 더 높아질 것입니다. 우리는 침실문이 소방대원들이 현장에 도착하여 거주자들을 구할 수 있을 만큼 오랫동안 가족을 보호할 수 있었을지 알 수 없습니다.

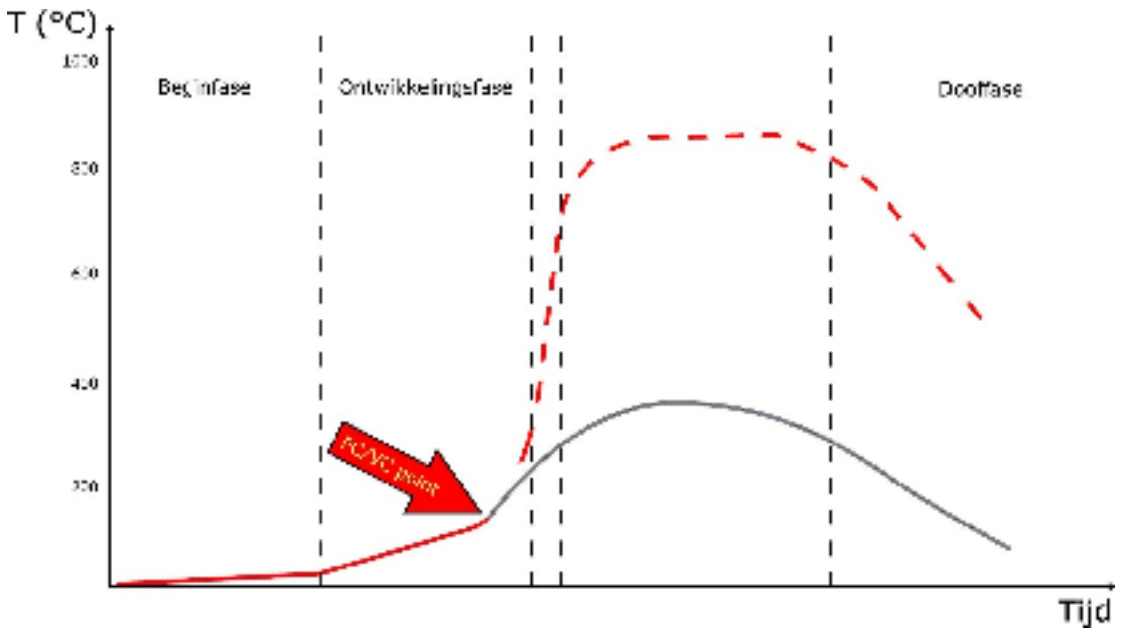

figure 2 When there is insufficient air, the fire passes from the red to the gray line. This is called an under ventilated fire. *(Figure: Karel Lambert)*

이 두 경우에 다른 유일한 변수는 화재 발화 시 호버보드(초기 가연물)의 위치입니다. 거실 내용물에 대한 다른 모든 것은 동일합니다. 한 시나리오에서는 많은 양의 연기 피해만을 초래하였지만, 다른 시나리오에서는 집이 타버리고 몇 명의 거주자가 사망하는 결과를 초래할 것입니다. 환기가 양호한 화재가 플래시오버에 도달하려면 충분한 가연물이 **적절한 위치**에 존재해야 합니다.

환기가 불량하여 플래시오버가 발생할 수 없는 경우, 우리는 환기가 불량한 화재 현장에 마주한 것입니다. 화재는 저절로 꺼지거나 추가적인 환기구가 만들어질 때까지 작은 규모의 화재가 유지될 것입니다. 이러한 화재는 그림 2.와 같이 또다른 화재 성장곡선을 그리게 될 것입니다.

그러나 이 글에서는 그림 1.과 같이 환기가 양호한 화재에 관하여 논의할 것입니다. 이 곡선은 대부분의 소방관들에게 화재-온도 곡선으로 알려져 있습니다. 이러한 유형의 곡선은 시간의 변화에 따른 온도의 변화를 보여줍니다. 이 문장에 대해 몇 가지 질문을 할 수 있습니다. 이 곡선으로 정확히 어느 온도를 알 수 있습니까? 다른 말로 하자면 상기에서 언급한 곡선에서 측정된 온도는 어느 시점에서 측정한 온도입니까? 대부분의 소방관들은 이 질문에 대답할 수 없습니다.

정답을 알고 계십니까? 이 글은 때때로 독자들에게 직접적으로 전달할 것입니다. 다음 부분을 읽기 전에 이 문제를 충분히 생각해 보시기바랍니다. 교과서가 당신에게 답을 알려주나요? 좋습니다! 그렇지 않다면, 왜 답이 틀렸는지 생각해보세요. 어느 경우든, 여러분은 무언가를 배울 것입니다.

2 Heat release rate of a fire

모든 화재는 일정한 열을 방출합니다. 이를 다음과 같이 설명할 수 있습니다. 3 인용 소파 위에 방치된 담배꽁초 때문에 소파에 불이 붙는다고 가정해 보겠습니다. 소파에서 0.25㎡의 면적이 불타고 있습니다. 불길이 소파에서 50cm 정도 치솟고 있습니다. 당신은 이 상황을 상상해 볼 수 있습니까?

화염의 열기는 대체로 위로 흐를 것입니다. 그곳에서, 화염은 연기층을 가열할 것입니다. 열의 일부가 소파 쪽으로 다시 방출될 것이고 이 열은 소파를 가열합니다. 소파(연료)의 온도가 높으면 소파의 일부가 열분해를 시작합니다. 이것은 소파가 질량의 일부를 잃고 있다는 것을 의미합니다. 만약 소파가 저울 위에 있다면, 우리는 연소하는 소파의 무게가 천천히 줄어드는 것을 볼 수 있을 것입니다. 이를 과학 용어로 질량 손실률(*Mass Loss Rate,* kg/s)이라고 합니다. 연료가 뜨거울수록 열분해 가스가 더 빨리 형성됩니다(그리고 저울의 눈금이 더 빨리 내려갑니다). 열분해 가스는 가스 연료에 지나지 않습니다. 화염은 이 열분해 가스에 의해 공급되고 있습니다. 화염이 주변 공기의 산소를 이용해 열분해 가스를 태우고 있습니다.

가스 레인지(gas stove)는 밸브를 열어 작동합니다. 다음으로 배출되는 가스가 스파크에 의해 점화됩니다. 밸브를 조작함으로써, 더 크거나 더 작은 화염이 만들어집니다. 하지만 실제 화재에서는 연소물질에 노출되는 열의 양에 의해 화염의 크기가 좌우됩니다. 연료가

뜨거울수록 단위시간당 더 많은 열분해 가스가 방출됩니다. 단위시간당 열분해 가스가 많을수록 화재의 열 방출 속도는 더 높습니다.

위의 내용은 연료 지배형 화재(fuel controlled fires)에만 적용됩니다. 화재발생 초기의 현장에는 공기가 풍부합니다. 화재의 열 방출 속도는 열분해 가스의 양(연료의 질량 손실률)에 따라 달라집니다. 화재가 환기 지배형으로 바뀌면, 모든 열분해 가스를 연소하기에는 공기가 부족해집니다. 이렇게 연소되지 않은 열분해 가스의 일부는 연기층에 더해질 것입니다. 이것은 연소되지 않은 입자들이 연기층에 축적되고 있다는 것을 의미합니다. 화재의 열 방출 속도는 사용 가능한 공기에 의해 제어되고 있습니다. 이는 그림 2.에서 화재가 빨간색의 곡선에서 회색 곡선으로 바뀌는 것과 같습니다. 그러나 이러한 현상은 그림 1.에서도 발생할 수 있습니다. 그림 1.에서 곡선의 기울기가 수평으로 바뀌기 직전에, 화재는 환기 지배형 상태였습니다. 두 화재 곡선 모두 환기 지배형 영역(ventilation controlled section)을 가지고 있습니다.

그림 1.의 곡선을 열방출율-시간 곡선으로도 설명할 수 있습니다. 이 곡선은 시간의 함수로써 시간이 변함에 따라 열방출율이 어떻게 변하는지를 보여줍니다. 그림 1.의 화재의 초기단계는 연료 지배형 화재이며 HRR 이 매우 제한된 것이 특징입니다. 화재는 성장단계를 거치면서 연료 지배형으로 유지되지만 플래시오버 중에는 환기 지배형으로 바뀝니다. 완전히 성장한 화재는 환기 지배형 화재 입니다. 완전히 성장한 단계에서 곡선의 기울기가 zero 인 부분(수평 부분)은 제한된 양의 공기만이 환기구를 통해 실내로 들어올 수 있기 때문에 생기는 직접적인 결과입니다.

3 Which information can be unpacked from the fire curve?

그림 3.에 나타난 화재를 예를 들어 보겠습니다. 분명히 완전히 성장한 화재입니다. 화염은 서로 붙어 있는 두 개의 창문을 통해 뿜어져 나오고 있습니다. 두 창문의 높이와 면적은 동일합니다.

figure 3 A view of a fully developed fire venting out of two windows. *(Photo: www.nufoto.nl)*

이 창문들이 거실에 연결되어 있고 거실 문이 닫혀 있다고 가정해 보겠습니다. 그러면 두 개의 창문이 사진 속 화재현장에서 유일한 환기구가 될 것입니다. 거실에는 소파, 커피 테이블, 책으로 가득 찬 캐비닛, TV, 등 많은 양의 연료가 있습니다. 거실 전체에 화염이 휩쌓인 것이 분명합니다. 화재의 HRR 은 실내로 유입되는 공기의 양에 의해 제어됩니다. 이것은 환기 지배형 화재의 전형적인 예 입니다.

이 화재는 물론 작은 불씨에서 시작되었습니다. 단순하게 생각하기 위해,

우리는 두 개의 창문이 처음에 열려 있었다고 가정해보겠습니다. 화재가 3 인용 소파에서 시작됐다고 가정하면 화재 초기에는 적은 양의 HRR 만 있습니다. 화재가 성장할수록, HRR 은 증가할 것입니다.

그림 4.는 시간이 경과함에 따라 HRR 이 어떻게 변화되는지를 보여줍니다. 화재는 작은 규모로 시작되어 성장하고 플래시오버에 도달하여 완전히 성장합니다(기울기가 zero 인 지점). 시간이 지나면 연료의 양이 크게 줄어들 것입니다. 연료가 많이 연소될 것이고 이것은 연료의 질량 손실 때문에 연료가 거의 남아있지 않을 것이라고 예상할 수 있습니다. 많은 양의 연료가 열분해 가스로 변하게 될 것입니다. 연료 하중(fuel load)의 70%가 연소되었을 때 소멸 단계(decay stage)가 시작된다고 가정 하는 것이 타당할 것입니다. 연료가 거의 남아 있지 않기 때문에 열분해 가스의 양은 감소합니다. 어느 시점에서는 모든 열분해 가스를 태우기에 충분한 공기가 다시 개구부를 통해 유입될 것입니다. 화재는 다시 한번 연료 지배형 상태가 될 것입니다. 열분해 과정이 더 줄어들면 HRR 도 감소하게 됩니다. 시간이 지나면 화재는 저절로 꺼질(self-extinguish) 것입니다. 열분해 가스의 생산량은 너무 적어져서 유염 연소(flaming combustion)를 더 이상 지탱할 수 없게 될 것입니다. 남은 연료는 계속 무염 연소(smoldering) 하겠지만 시간이 지나면서 모든 것이 식을 것이고 화재는 완전히 꺼질 것입니다.

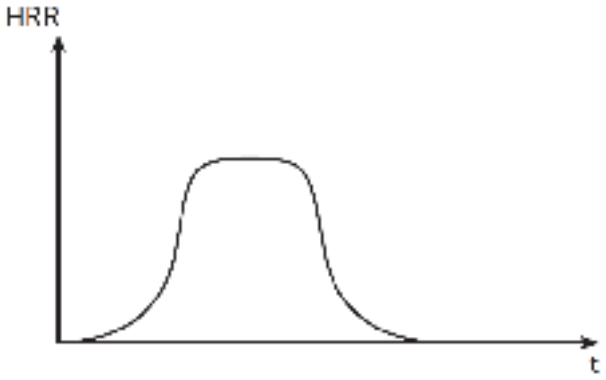

figure 4 Heat release rate as a function of time in a ventilated fire. *(Drawing: Karel Lambert)*

화재가 첫번째 거실과 동일하게 같은 크기로 지어진 다른 거실에서 시작됐다고 가정해 보겠습니다. 연료 하중이 동일하고 가구(소파, 테이블 등)가 정확히 같은 위치에 있다고 가정하고 화재 또한 정확히 동일하게, 3 인용 소파 위에 방치된 담배꽁초 때문에 불이 붙는다고 가정하겠습니다. 단 한 가지를 제외하고 모든 것이 첫 번째 화재 시나리오와 동일합니다. 즉, 창문이 두 개 대신 하나만 있습니다. 창문의 면적이 첫 번째 화재 시나리오의 절반입니다. 이것이 HRR 에 미치는 영향은 무엇일까요? 창문이 두 개였을 때보다 화재는 더 느리게 진행될까요? 아니면 어떻게든 더 빨리 진행될까요?

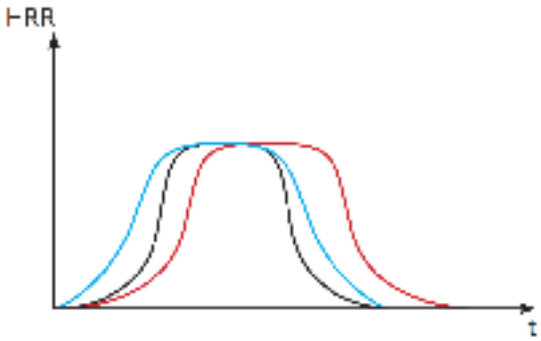

figure 5 Two possible variations of a HRR graph for a fire with one instead of two windows. *(Figure: Karel Lambert)*

그림 5.는 두 개의 열린 창문이 있을 때 화재가 어떻게 진행되었는지를 보여주는 검은색 곡선을 보여주고 있습니다.

파란색 곡선은 화재가 더 빠르게 진행되고 있음을 보여줍니다.

빨간색 곡선은 화재가 더 느리게 진행되고 있는 것을 보여주고 있습니다. 둘 중 어느 것이 올바른 화재성장 곡선인가요? 아니면 둘 다 잘못된 화재성장 곡선인가요?

여러분의 생각을 뒷받침할 주장을 생각해 보시기바랍니다.

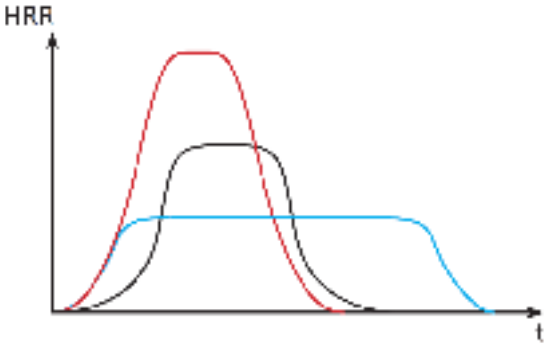

figure 6 Two other possible outcomes for the HRR of the fire when there is only one window instead of two. *(Figure: Karel Lambert)*

그림 6.에서 두 개(파란색, 빨간색)의 곡선은 검은색 곡선보다 모두 더 빠르게 화재성장이 진행되지만 HRR 이 높거나 낮은 두 개의 곡선을 만들 수도 있습니다. 검은색 곡선은 창문 두 개가 열린 거실의 화재를 보여줍니다. 파란색 곡선은 화재가 더 빨리 성장하지만 빠르게 성장을 멈추고 낮은 HRR 에서 계속 연소되는 것을 나타냅니다. 파란색 곡선의 화재는 이 단계를 더 오래 지속시킵니다.

빨간색 곡선은 불이 더 빨리 성장하고 HRR 이 더 높은 곳에 도달하는 것을 나타냅니다. 때문에 화재의 지속시간은 오래 걸리지 않게 됩니다. 이 두 곡선 중 하나가 하나의 열린 창문이 있는 거실의 화재를 정확하게 나타내고 있을까요?

다시, 여러분의 추론을 뒷받침할 주장을 생각해 보시기바랍니다.

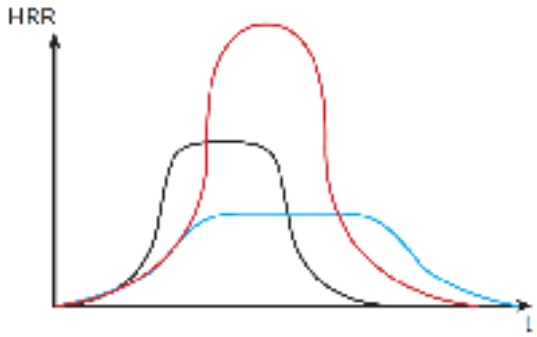

figure 7 Two new possible variations for the same fire. *(Figure: Karel Lambert)*

그림 7.은 그림 6.의 곡선들의 변화를 보여주고 있습니다. 이번에는 빨간색과 파란색 곡선이 두 개의 열린 창문(검은색 곡선) 거실의 화재보다 더 느리게 성장하는 화재를 나타냅니다. 그림 6.과 마찬가지로 파란색 곡선은 검은색 곡선보다 낮은 최대 HRR 을 나타납니다. 빨간색 곡선은 검은색 곡선보다 더 높은 최대 HRR 에 도달합니다. 이 곡선들 중 하나가 (열린 창문이 하나인) 올바른 화재성상 곡선이 맞을까요?

이것에 대해 비판적으로 생각하고 해답을 찾아내는 것은 여러분에게 달려 있습니다.

그림 5, 6, 7.은 모두 검은색 곡선으로 묘사된 화재보다 빠르거나 느리게 성장하는 화재를 나타냅니다. 하지만, 화재의 성장은 두번째로 열려진 창문에 의해 영향을 받지 않을 수도 있습니다. 그림 8.은 이러한 두 가지 가능성을 보여줍니다. 파란색 곡선은 검은색 곡선의 화재성장과 초기 단계가 정확히 일치합니다. 이것은 화재가 정확히 같은 방식으로 성장하고 있다는 것을 의미합니다. 그러나, 화재는 이후 단계에서 덜

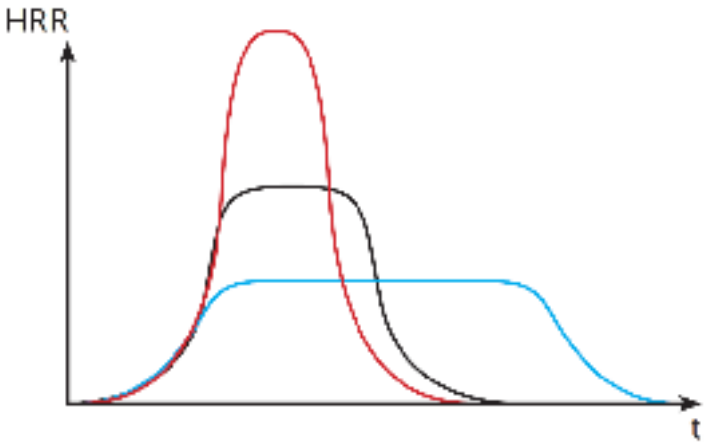

figure 8 Again two possible representations of the HRR of a fire with one open window instead of two. *(Figure: Karel Lambert)*

강렬해집니다(낮은 최대 HRR). 빨간색 곡선의 화재는 초기단계에서 검은색 곡선의 화재와 같은 성장형태를 가지지만, 두 개의 창이 열려 있는 화재보다 높은 최대값의 HRR 을 보여줍니다. 이 곡선들 중에 (열린 창문이 하나인) 정확한 화재성장 곡선이 있을까요? 아니면 아직 나오지 않은 또 다른 가능성이 있을지도 모릅니다.

여러분의 대답과 왜 그것이 옳다고 생각하는지 생각해 보세요.

4 The effect of one window instead of two.

검은색 곡선은 두 개의 열린 창문이 있는 거실에서 발생한 화재에 대해 시간이 변함에 따라 화재의 HRR 이 어떻게 변화되는지를 보여줍니다. 곡선의 첫 부분은 화재의 초기 단계와 성장 단계를 나타냅니다. 그 단계에서 화재는 연료 지배형 상태 입니다. 이것은 생산되고 있는 열분해 가스를 연소시키기에 충분한 공기가 있다는 것을 의미합니다. 환기가 가능한 개구부의 크기를 늘린다면, 이것은 화재의 성장에 영향을 미치지 않을 것입니다. 즉, 이미 충분한 양의 공기가 화재실에 있는 상태입니다. 또한 환기가 가능한 개구부의 크기를 줄이는 것도 화재 초기 단계에서 화재의 성장에 영향을 미치지 않습니다. 생산되고 있는 열분해 가스를 태우기에 충분한 공기가 환기구를 통해 유입되는 한, 화재는 연료로 제어될 것이고 이것은 화재 성장에 환기 증가의 영향이 없다는 것을 의미합니다.

연료 지배형 화재는 초기 단계에서 두 개의 창이 아닌 하나의 창이 열리더라도 연소속도가 더 빨라지거나 더 느려지지 않습니다. 두 개의 화재(열린 창문이 두 개인 화재와 하나인 화재)를 나타내는 곡선이 일치합니다.

열린 창문이 하나인 거실 화재도 성장하여 플래시오버 현상이 발생합니다. 열린 창문을 통해 충분한 공기가 방안으로 유입되어 화재를 성장하게 합니다. 열려 있는 창문의 면적은 적어도 특정 크기(a certain minimum size)보다 커야 합니다. 거실의 화재는 특정 HRR(a certain HRR)까지 성장할 수 있어야 방 안에서 플래시오버가 발생 할 수 있습니다. 그림 3.의 두 개의 창문이 원래 창문 하나 크기의 1/4 크기의 창문으로 교체되었다고 가정하면 플래시오버 발생 전에 화재는 환기 지배형 상태로 바뀔 수 있습니다. 그림 2.는 이 시나리오를 설명하는 화재 곡선일 수 있습니다.

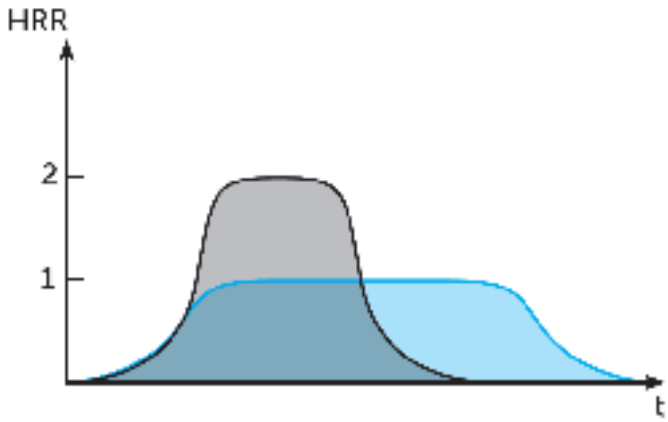

figure 9 The blue graph produces only half of the maximum HRR of the black graph. Because of this the fuel is consumed more slowly and the graph is about twice as long. *(Figure: Karel Lambert)*

두 번째 화재 시나리오에서 거실의 창문의 면적이 첫 번째 화재 시나리오의 절반 정도일 때, 공기의 유입량은 첫 번째 시나리오에서의 절반이 될 수 있습니다. 이는 두 번째 화재로 인해 발생하는 HRR 이 첫 번째 화재의 절반임을 의미합니다. 그림 8.의 파란색 곡선이 질문의 정답 입니다. 화재 성장 곡선의 높이(최대 HRR)는 열려 있는 창의 총 면적에 따라 결정됩니다. 환기가 가능한 개구부의 면적은 주어진 시간에 얼마나 많은 공기가 유입될 수 있는지를 결정하고,

따라서 그 환기구의 면적은 최대 HRR 이 얼마가 될지를 결정합니다. 파란색 곡선의 최대의 높이는 검은색 곡선의 절반이어야 합니다. 두 개의 창문이 아닌 네 개의 창문이 열린다면 그림 8.의 빨간색 곡선이 정답이 될 것입니다. 검은색 곡선의 화재보다 정확히 두 배 크기의 HRR 에 도달해야 할 것입니다.

마지막으로, 곡선 아래의 면적이 연료 하중을 나타낸다는 것을 깨닫는 것도 중요합니다. 이것이 그림 8.의 파란색 곡선이 검은색 곡선보다 화재 지속시간이 더 긴 이유입니다(빨간색 곡선의 지속시간이 더 짧습니다). 최대 HRR 이 검은색 곡선의 절반에 불과할 때, 연료는 주어진 시간에 절반만 연소됩니다. 이는 연료 하중(연소시간)이 두 배 더 오래 지속된다는 것을 의미합니다. 이것을 설명하는 완벽한 예는 나무 난로입니다. 난로에 나무 장작을 얼마든지 넣어 불을 피울 수 있습니다. 하지만 공기 흡입구를 절반으로 줄이면, 스토브가 만들어내는 열은 줄어들 것입니다(HRR 이 반으로 줄었기 때문입니다). 난로에 있는 나무는 두 배 더 오랫동안 탈 것입니다.

이는 그림 9.에서 명확히 볼 수 있습니다. 회색으로 표시된 면적은 파란색으로 표시된 면적과 같아야 합니다. 결국 그것들은 정확히 동일한 연료 부하를 나타냅니다. "검은색 곡선"의 화재에서는 사용 가능한 공기의 두 배 양이 있으므로 연료가 두 배 더 빠르게 소모됩니다. 이것은 화재의 지속 시간이 절반으로 줄어든다는 것을 의미합니다.

5 Bibliography

[1] *Lambert Karel, Baaij Siemco (2018) brandverloop: technisch bekeken, tactisch toegepast, 2nd edition, Sdu*
[2] *Lambert Karel (2009-2019) CFBT-instructor course for the Attack cell, CFBT-BE*
[3] *McDonough John (2009-2019) personal talks*
[4] *Grimwood Paul (2008-2019) personal talks*

Karel Lambert