

What is air track?

1 Introduction

SAHF 모델은 2000년대 초에 호주의 Shan Raffel 에 의해 고안되었습니다. 동료들과 많은 논쟁을 한 후, 그리고 미국의 Ed Hartin 의 영향을 받아 이 모델은 나중에 B-SAHF 로 바뀌었습니다. 이 모델은 "화재를 읽는 것(reading the fire)"이라고도 불립니다. 화재 현장에서 어떤 종류의 화재를 직면하고 있는지 알아내는 도구입니다. B-SAHF ¹ 는 건물(Building), 연기(Smoke), 공기 흐름(Air track), 열(Heat) 및 화염(Flames)의 약자입니다. 이 글의 목적은 공기 흐름이라는 매개 변수를 상세히 설명하는 것입니다.

2 Air track

2.1 Why does smoke flow?

2.1.1 Buoyancy or Archimedes' principle

어떠한 흐름을 설명하는 이론(유체역학)은 매우 복잡합니다. 많은 물리적 매개 변수가 관련되어 있습니다. 이 글에서 저는 공기의 흐름을 중심으로 화재 현장에서 무슨 일이 일어나고 있는지 설명하려고 노력할 것입니다.

화재 행동에서 화점이 중요한 역할을 하게 됩니다. 화점으로부터 뜨거운 연기가 발생합니다. 이 연기는 주변 공기보다 더 뜨겁습니다. 우리 모두는 물체가 뜨거워지면 팽창한다는 것을 알고 있습니다. 고체와 액체의 경우는 온도 상승에 따른 부피 팽창이 다소 제한적입니다. 반대로, 가스(기체)의 경우, 온도 상승은 많은 부피 팽창을 야기합니다. 이러한 부피 팽창 때문에, 가스의 밀도는 감소합니다. 가스의 무게가 줄어든다는 뜻입니다. 화재현장에서 315 °C 인 연기는 주변의 20 °C 인 공기 밀도의 절반 값을 가집니다. 온도의 증가는 밀도의 감소를 야기합니다.

그렇다면 밀도차가 의미하는 중요성한 점은 무엇일까요? 이것을 이해하기 위해서는 사고 실험(머리속의 상상실험)이 필요합니다. 물이 담긴 욕조를 생각해 봅시다. 손으로 탁구공을 욕조 바닥에 강제로 가라앉히고 손을 놓는다는 상상을 해 봅시다. 그러면 탁구공이 수면 위로 떠오를 것입니다. 공이 떠오른 이유는 밀도의 차이 때문입니다. 물이 탁구공을 위로 떠오를 수 있도록 힘을 가했습니다. 이것은 아르키메데스의 원리라고 불립니다. 떠오려는 힘(부력)은 공의 부피와 공과 물의 밀도 차이에 정비례합니다. 탁구공이 물보다 훨씬 가볍기 때문에, 탁구공은 떠오를 것입니다.

연기가 주변 공기보다 밀도가 낮기 때문에 연기는 상승할 것입니다. 연기가 상승하는 동안, 공기는 연기 속으로 섞여 들어가고 있습니다. 이것은 연기의 온도를 떨어뜨립니다. 온도가 떨어지기 때문에 밀도의 차이도 줄어들습니다. 그리고 그 후에 부력도 감소할 것입니다.

¹ B-SAHF 는 나중에 화재현장의 환경(Environment) 요소가 추가되어 현재는 BE-SAHF 모델이라고도 합니다.

연기가 식기 시작하는 순간부터 주변 공기와 온도가 동일한 지점까지 연기는 상승속도가 느려지다가 멈추게 됩니다. 담배를 피우는 사람들로 가득 찬 방에서 가끔 이런 현상을 관찰할 수 있습니다.

탁구공과는 달리 우리는 한 입자의 연기가 아니라, 연기의 연속적인 흐름을 다루고 있습니다. 그리고 물이 담긴 욕조와는 달리 물 표면은 없습니다. 여기 공기의 경계는 천장이 됩니다. 따라서 연기는 무한정 상승할 수 없을 것입니다. 우리는 마치 수족관 바닥에 탁구공 수십 개를 놓아주는 것처럼 이것을 상상할 수 있습니다. 잠시 후 천장에 도착하는 공들은 이미 그곳에 있는 공들을 밀어낼 것입니다. 같은 일이 연기의 흐름에서 일어납니다. 연기가 천장까지 수직으로 흐른 뒤 방향을 바꿔 천장을 따라 수평으로 흐릅니다.

2.1.2 Difference in pressure

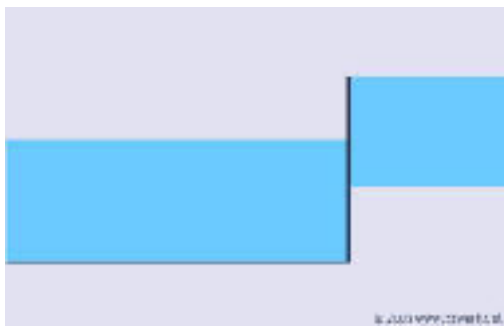


Figure 1 Schematic drawing of a dam.

공기 흐름(air track)을 살펴보는 또 다른 방법은 두 영역 간의 압력 차이를 살펴보는 것입니다. 이것의 유명한 예는 댐입니다. 댐은 한쪽은 높은 수위를, 다른 한쪽은 낮은 수위를 만들어내기 위해 건설됩니다. 이 때문에 한쪽의 압력이 다른 쪽보다 큼니다. 표면 아래에서 수문을 열어 물이 한 쪽에서 다른 쪽으로 흐를 수 있도록 할 수 있습니다. 물은 항상 고압 영역에서 저압 영역으로 흐릅니다. 흐름은 압력의 차이를 보상하려고 시도하고 있습니다.

이 흐름은 더 이상 압력 차이가 없을 때까지 계속됩니다. 압력 차이가 클수록 흐름이 더 격렬해집니다.

가스를 다룰 때도 같은 현상이 일어납니다. 자가 호흡 장치(SCBA)는 소방관들 사이에서 잘 알려진 압력이 다른 기체의 흐름을 보여주는 예입니다. 공기용기 안의 공기는 주변 공기보다 몇백 배 더 많은 압력으로 유지되고 있습니다. SCBA의 밸브가 열리면 용기의 과도한 압력이 빠져나갈 수 있습니다. 공기가 배출되고 이것은 많은 소음을 발생시킵니다. 공기가 매우 빠르게 흐르고 있습니다. 이는 SCBA 용기 내부의 공기와 외부의 대기압의 큰 차이 때문입니다. SCBA에서 공기가 서서히 빠져나가면 내부 압력이 감소합니다. 공기가 빠져나가는 속도가 감소하고 소음도 줄어들 것입니다. 그러나 SCBA 공기압이 외부 압력과 같을 때까지 공기의 흐름은 계속됩니다. 화재 현장에서 특정 구역에 과압이 생성되었을 때 개구부가 생기면 공기 흐름(air track)이 만들어집니다. 자연은 압력의 차이를 없애려고 노력할 것입니다.

2.2 What happens next?

화재의 규모가 커짐에 따라 화재는 더 많이 성장 할 것입니다. 불길이 커지고 확대되면 방출되는 에너지의 양은 늘어납니다. 이 경우 발생하는 연기의 양도 증가합니다.

Karlsson & Quintierre 는 그들의 책 "Inclosure Fire Dynamics"에서 화재 성장을 이야기 하였습니다. 설명은 다소 개략적이지만, 실제 현장을 이해하기위한 대한 좋은 접근법입니다. 화재 초기 단계부터 완전히 성장된 단계까지 화재현장에서 볼 수 있는 네 가지 압력 프로파일(profile)을 설명하고 있습니다. 화재의 초기 단계에서 연기에 의해 화재실 내부에

과압이 발생하고 있습니다. 생산되고 있는 연기는 더 많아질 것이다. 이 과정은 주변 공기에 의해 방해받고 있습니다. 때문에 약간의 과도한 압력을 유발합니다. 출입구를 개방 할 경우 압력이 완화될 수 있습니다.

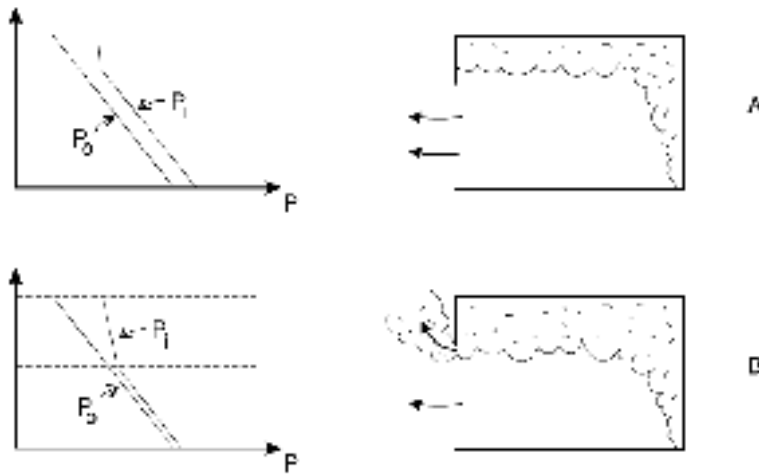


그림 2 에서, A 의 프로파일은 화재의 초기 단계에서의 상황을 나타내고 있습니다. 화점에서 연기가 발생하고 있으며 연기가 상승하여 천장부터 연기층이 형성되어 점차 아래로 내려오게 될 것입니다.

그 화재는 상층부에 약간의 과압을 발생시킬 것입니다. 이 부분 때문에 실내에서 연기보다 더 차가운 공기는

Figure 2 Pressure profiles A and B. (Graph: Karlsson & Quintiere)

강제로 배출될 것입니다. 이 그림의 왼쪽에는 압력 프로파일이 그래프로 나타나 있습니다. 그래프에서 수평축은 압력을 나타내고 수직축은 높이를 나타냅니다. 이것은 오른쪽으로 갈수록 압력이 증가한다는 것을 의미합니다. P_0 이라고 표시된 선은 화재실 외부의 공기압을 나타냅니다. 기압은 지구의 공기의 무게때문에 발생합니다. 높은 곳으로 갈수록 공기가 희박해지고 기압이 감소합니다. 선의 기울기는 분명히 과장된 것이지만, 이것은 현상을 더 명확하게 설명하는 데 도움이 됩니다. 화재실 내부의 압력은 P_i 이라고 표시 됩니다. 그래프에서 내부의 압력이 외부보다 약간 높다는 것을 보여줍니다. P_i 는 오른쪽을 향해 더 많이 위치해 있습니다. 또한 분명한 것은 이 선이 P_0 선과 거의 평행하다는 것입니다. 실내의 공기는 바깥과 거의 같은 온도를 가지고 있다. 이 경우 압력도 높이에 따라 동일하게 감소합니다. 하지만 연기층이 있는 부분에서는 P_i 의 기울기가 변합니다. 연기층의 온도는 주변 공기의 온도보다 훨씬 높습니다. 따라서 연기의 밀도는 더 낮습니다. 이것은 연기가 주변 공기보다 무게가 덜 나간다는 것을 의미합니다. 만약 그러한 환경에서 연기가 상승한다면 (천장에서부터 축적되어 층을 이룬 연기층에서는), 압력 감소의 기울기가 더 작아질 것입니다.

화재가 성장하면 여러 가지 일이 일어납니다. 연기층이 내려갈 것입니다. 이는 P_i 의 기울기가 바뀌는 지점도 더 낮아진다는 것을 의미합니다. 출입문이 개방되면 공기가 빠져나가기 때문에 과압이 감소합니다. P_i 는 왼쪽으로 이동하여 P_0 에 더 가깝게 배치됩니다. P_0 은 외부 기압을 나타냅니다. 이 선(P_0)은 화재 성장 내내 변하지 않을 것입니다. 간단히 말해서, 화재가 성장해서가 아니라, 화재실 내부의 압력 상태에 변화가 있다는 것입니다.

그 후 연기층이 개구부 높이 아래로 떨어지는 순간 두 번째 압력 프로파일이 생성됩니다. 이 압력 프로파일은 프로파일 B 라고 하며 몇 분 동안만 지속됩니다. 이 단계에서는 시원한 공기와 뜨거운 연기가 출입구를 통해 흐릅니다. 이렇게 하면 실내의 과압이 빠르게 제거됩니다. 이것은 이어지는 화재 성장을 이해하는 데 필요한 일종의 과도기적 단계입니다.

2.3 The development phase and the fully developed fire

화재는 이미 성장 단계에 이르렀습니다. 연기층이 이미 심하게 내려앉았다. 연기의 온도가 많이 올랐습니다. 화점에서는 상당한 양의 공기를 소비하고 있습니다. 방 안의 공기는 더 이상 화재를 지속시키기에는 충분하지 않습니다. 바깥에서 공기가 유입되어 화재에 필요한 공기를 충족시키고 있습니다. 압력 프로파일 C가 만들어집니다.

내부 압력 그래프 P_i 가 왼쪽으로 더 이동합니다. P_i 가 더 왼쪽으로 이동해 현재 지점에서 외부의 기압은 내부 기압보다 높은 상태입니다.



연기층이 훨씬 더 아래로 내려오기 때문에, 이제 프로파일 B의 기울기가 바뀌는 지점보다 프로파일 C의 기울기가 바뀌는 지점이 훨씬 더 지면에 가깝게 내려 온 것을 볼 수 있습니다. 이제 두 개의 구역을 명확하게 구분할 수 있습니다.



Figure 3 Pressure profiles C and D (Graph: Karlsson & Quintiere)

첫 번째로 연기층 아래 구역의 온도는 대략 외부 온도와 같은 구역입니다. 이 구역에서는 두 선이 평행하게 유지됩니다. 밀도가 같기 때문에 기압은 높이에 따라 똑같이 감소할 것입니다. 내부 압력이 외부 압력보다 낮기 때문에 외부에서 내부로 유입되는 공기 흐름(air track)이 형성되고 있습니다. 이것은 화재에 공급되는 공기의 흐름입니다.

두 번째 구역은 연기층에 의해 형성된 구역입니다. 연기층 안에서는 P_i 선의 기울기가 변합니다. 이는 내부 압력과 외부 압력의 차이가 줄어들고 있음을 의미합니다. 특정 지점에서 내부 압력(P_i)을 나타내는 선이 외부 압력(P_e)을 나타내는 선과 교차합니다. 이 지점에서 내부 압력은 외부 압력과 같습니다. 이를 중성대라고 합니다. 일반적으로 중성대는 연기층의 바닥으로부터 약 10cm 위에 위치합니다. 이 10cm의 구별은 진압대원들에게는 별로 중요하지 않습니다. 실제로 연기층의 바닥은 중성대의 위치에 대한 좋은 표시로 사용됩니다.

중성대보다 높은 곳에서는 두 선(P_i 와 P_e)이 각각의 기울기를 따라 그려집니다. 이로 인해 내부와 외부 사이에 새로운 압력 차이가 만들어집니다. 실내 압력이 외부 압력보다 더 높습니다. 이 압력 차이는 높아질수록 더 커집니다. 중성대에서 더 높을수록 압력 차이가 커집니다. 중성대보다 낮은 곳에서는 그렇지 않습니다(P_i 와 P_e 의 기울기가 같아집니다). 그곳에서 압력의 차이는 모든 높이에 대해 일정하게 유지됩니다. 중성대보다 높은 곳에 연기 흐름이 생성됩니다. 이 흐름이 이동하는 속도는 연기가 뜨거워질 때, 그리고 중성대에서 더 높이 올라갈수록 빨라집니다. 압력 프로파일 C의 하부에서의 외부 공기가 내부로 유입되는 흐름과 상부에서의 내부 연기가 외부로 배출되는 흐름이 있습니다. 이 프로파일은 플래시오버 전까지 유지됩니다. 이 상태가 지속되는 기간은 연료 하중과 격실의 세부 사항에 따라 달라집니다. 이전 글에서 언급했듯이, 이 기간은 지난 수십 년 동안 상당히 짧아졌습니다. 플래시오버가 발생하는 데 걸리는 시간은 일반적으로 3~4분입니다. 경험에 따르면 실내에서 화재 연료가 확산되거나 너무 개구부로 인한 산소 부족으로 인해 플래시오버가 지연될 수 있습니다.



Figure 4 Double flow for a compartment fire. Smoke is flowing out from the top of the door opening. Air is flowing in from the bottom. (Photo: Nico Speleers)

플래시오버 이후에는 온도가 다른 두 개의 별도 구역이 더 이상 존재하지 않습니다. 화재실 전체는 거의 동일한 온도를 가진 단일 구역으로 간주됩니다. 더 이상 명확한 연기층이 존재하지 않습니다. 개구부의 바닥에서는 여전히 신선한 공기가 유입되고 있지만 성장 단계에서 명확하게 구별 할 수 있었던 연기층이 이제 화재실을 완전히 가득 채웠습니다. 게다가 연기에도 화염이 발생했습니다. 그림 3의 프로파일 D는 이 단계의 압력 프로파일을 나타냅니다. 외부 공기 압력 p_0 는 여전히 변하지 않습니다. 내부의 압력 프로파일이 새로운 형태를 띠고 있습니다. 실내 온도가 실내 전체에서 거의 같다는 점을

고려하면, 이 압력을 나타내는 선은 더 이상 기울기가 변하지 않고 일정합니다. 실내 온도는 외부보다 훨씬 높습니다. 이것은 내부의 밀도가 외부보다 훨씬 낮다는 것을 의미합니다. 또한 지면에서부터 높이가 증가함에 따라 압력의 감소량이 줄어듭니다. 이제 두 압력 선이 교차하는 지점이 중성대에서 나타납니다. 이 지점에서의 내부 압력은 외부 압력과 동일합니다. 이 중성대를 기준으로 아래에서 공기는 화재실로 유입될 것이며 중성대 위에서는 연기(및 화염)는 바깥쪽으로 배출 될 것입니다.

3 Practical?

위의 단락에서 격실 화재에서 내·외부의 압력 차이와 공기 흐름(air track)이 만들어지는 것에 대해 설명하였습니다. 이어서 격실 화재에 속하는 다양한 압력 프로파일이 논의 되었습니다. 화재를 읽는 동안 이 지식을 실질적으로 적용할 수 있습니다. 화점에서 외부로 연기가 흐르는 길을 유로(flow path)이라고 합니다. 화재 발생에 관한 지식과 결합된 공기흐름을 잘 관찰하면 화재에 대한 많은 정보를 얻을 수 있습니다. 그러나 이 모든 것은 작은 격실에서만 적용된다는 것을 깨닫는 것도 매우 중요합니다. **이것은 70m² 이하의 격실과 높이 4 미터 미만의 격실에서 상기의 모든 것들이 잘 적용된다는 것을 의미합니다.**

3.1 Height of the smoke layer

연기층의 높이는 우리에게 화재의 성장 단계에 대해 말해줍니다. 천장에 연기층만 있다면 화재는 아직 초기 단계일 것입니다. 하지만 이것 또한 100% 확신할 수 없습니다. 높은 곳에 환기구가 있을 가능성이 충분히 있고 이 경우 연기가 정상적으로 표시되는 데 영향을 미칠 것입니다.

그러나 연기층이 약 1m 두께에 도달했다면 화재는 성장 단계에 도달한 것입니다. 최근의 연구에 따르면 산소가 충분한 화재가 플래시오버에 도달하는 데 필요한 시간은 약 2분에서 4분입니다. 화재가 성장하는 중에 플래시오버 무렵에 도달하면, 연기층은 내려갈 것입니다.

연기층이 바닥에서 1m 까지 내려갔을 때, 화재의 상태는 플래시오버의 발생이 매우 가까워졌다는 것을 의미합니다. 연기 층의 높이(그리고 약간 더 높은 곳에 위치한 중성대의 높이)는 화재가 확산되는 속도와 플래시오버 발생 위험을 모두 평가하는 데 사용할 수 있는 좋은 지표입니다.

3.2 Speed of the flows

이 글의 시작은 온도 차이로 인해 흐름이 어떻게 만들어지는지를 설명하였습니다. 차이가 클수록 흐름이 빨라집니다. 연기가 매우 빠르게 흐르기 시작하면 난류(turbulence)가 뚜렷하게 보일 것입니다. 흐름의 속도를 관찰함으로써 화재의 강도를 평가할 수 있습니다. 강렬한 화재는 더 많은 열을 만들어 낼 것이고 이 열은 더 큰 온도차로 이어질 것입니다. 그러면 흐름이 빨라질 것이고 흐름의 속도를 통해 화재가 잘 성장했는지 여부를 추론할 수 있으며 이것은 또한 화재가 성장 단계에 도달했음을 나타냅니다.

3.3 Where's the fire?

그 공기의 흐름은 또한 우리에게 화점의 위치에 대한 것을 가르쳐줍니다. 연기는 화점에서부터 빠져나갈 것입니다. 연기를 관찰할 때 연기가 어느 방향으로 흐르는지 (열화상카메라를 사용하여) 판단할 수 있습니다. 연기의 흐름을 거슬러 올라가면 화점에 도달할 것입니다.

그 반대로 결론지을 수 있습니다. 문이 열렸는데도 연기가 움직이지 않을 때, 이것은 아마 그 방이 화재실과 연결되어 있지 않다는 것을 의미할 것입니다.

분명히 문을 열기 전에 유로(flow path)에 있지 않았을 가능성도 고려해야 합니다. 출입구를 열면 흐름이 시작됩니다. 이것은 화재의 위치에 대한 정보를 제공하지만, 이 새로 만들어진 공기 흐름이 화점에 추가 산소를 제공할 것이라는 것을 깨닫는 것도 마찬가지로 중요합니다.

4 Bibliography

- [1] *Enclosure fire dynamics*, Bjorn Karlsson & James Quintiere, 2000
- [2] *Binnenbrandbestrijding*, Koen Desmet & Karel Lambert, 2008 & 2009
- [3] Shan Raffel, www.cfbt-au.com
- [4] Ed Hartin, www.cfbt-us.com

Karel Lambert