

The most familiar form of Rapid Fire Progress: Flashover

이전 글에서 저는 환기가 잘되거나 환기되지 않는 화재의 행동에 대해 논의했습니다. 우리는 충분한 연료와 산소 조건에서의 격실화재는 격실 전체가 화염에 휩싸이는 상태로 발전 할 것이라고 예상 할 수 있습니다. 이러한 급속한 화재성장 현상을 플래시오버라고 합니다. 플래시오버 때문에 최근 수십 명의 소방관이 순직하였습니다. 이러한 순직(LODD: Line Of Duty Deaths)과 관련된 사고는 플래시오버와 유사한 급속한 화재성장 현상을 보여 줍니다.

소방관들은 아직 성장 단계에 있는 화재현장에 도착합니다. 건물 내부진입은 검색 및 구조 작업을 수행하거나 화재 공격 전술을 수행하기 위해 이루어집니다. 구조대상자 및 화점을 찾는 동안 화재로 인해 발생하는 위험 증가에 거의 주의를 기울이지 않을 수도 있습니다. 이러한 상황에서 플래시오버가 발생할 때, 소방관들은 종종 모르고 있다가, 심각한 부상을 당하거나 화재 현장에서 순직합니다.

플래시오버는 화재가 성장 단계에서 최성기 단계로 급속하게 성장하는 현상을 말합니다.

1. Different kinds of flashover

1.1 "Common" flashover

일반적인 플래시오버는 환기가 양호한(산소가 충분한) 화재현장에서 화재성장의 정상적인 부분입니다(그림 1.1 참조). 그림은 화재가 성장 단계에서 최성기의 단계로 옮겨가는 것을 보여줍니다. 성장기 동안, 천장에 뜨거운 연기층이 형성됩니다. 이 층은 연기와 접촉하는 모든 물체에 열을 전달합니다(캐비닛, 가연성 벽 마감재 등). 이를 대류를 통한 열 전달이라고 합니다. 이와는 별도로, 연기는 의자, 테이블 등 연기층 아래의 물체로 열을 방사합니다. 이를 복사를 통한 열 전달이라고 합니다.

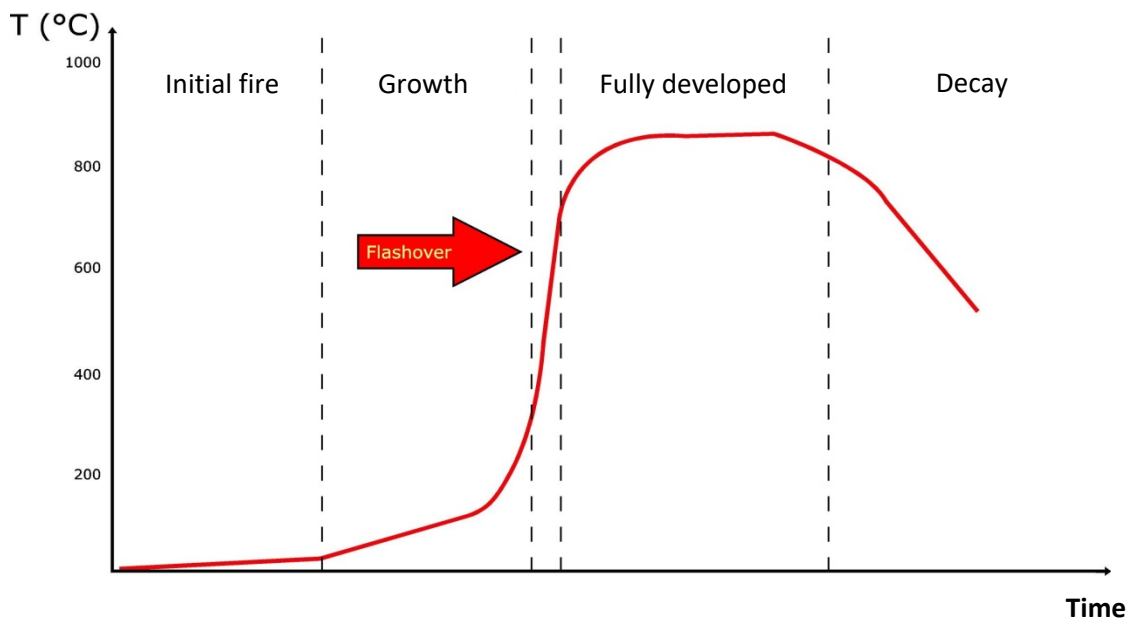


Fig. 1.1 Ventilated fire development (Graph: Karel Lambert)

두 가지 열 전달 과정 모두 실내의 모든 가연물을 가열시킵니다. 특정 시점에 온도가 열분해 임계값에 도달하면 가연물의 온도가 너무 높아져서 열분해되기 시작합니다. 플래시오버 이전에는 롤오버가 관찰됩니다. 롤오버는 연기층 전체에 걸쳐 화염이 이동하는 현상으로 나타납니다. 이것은 연기의 온도를 크게 상승시켜 연기층 아래의 모든 가연물로 향하는 열방사를 증가시킵니다. 만약 가연물에 대한 열분해가 아직 시작되지 않았다면, 이제 곧 시작될 것이고 격실 전체가 화염에 휩싸이게 될 것입니다.

플래시오버가 발생하는 동안, 실내 온도는 극도로 상승할 것입니다. 단 몇 초만에, 온도는 600°C 까지 상승할 것입니다. 복사 열량도 증가하고 격실내 사람의 생존은 불가능해집니다. 플래시오버가 발생하는 격실에 있는 진압대원들은 살아서 나갈 시간이 단 몇 초밖에 없습니다. 심지어 밖으로 탈출한다하여도 그들은 종종 심각한 화상을 입었을 것입니다. 따라서 플래시오버가 발생하기 전에 화재실을 탈출해야 합니다.

1.2 "Ventilation induced" flashover

환기유도 플래시오버는 화재가 환기가 불량한 FC/VC 지점(Fule controlled 에서 Ventilation controlled 로 전환되는 지점)에서 충분한 열이 축적된 후에만 발생합니다. 이것은 산소 부족이 화재 발생 초기에 화재의 성장을 억제한다는 것을 의미합니다. 만약 화재의 환기 프로파일에 변화가 없다면, 화재는 저절로 소멸될 것입니다. 그림 1.2의 노란색 그래프는 그 현상을 나타내고 있습니다. (적색 점선의 그래프는 일반적인 플래시오버를 나타냅니다.) 노란색 그래프를 잘 보시면 처음에는 화재의 성장률이 느려지고 곧 감소하기 시작합니다. 수많은 매개변수가 환기되지 않는 화재성장 단계에서 화재실내의 열 축적량을 결정합니다. 충분한 열을 가하면, 방 안에 있는 많은 물건들이 계속해서 열분해를 일으킬 것입니다. 우리는 다시 기체화된 연료의 공급에 직면할 것입니다. 분명히 이것은 현대적이고 잘 단열된 주택에서 자주 반복되는 문제가 될 것입니다.

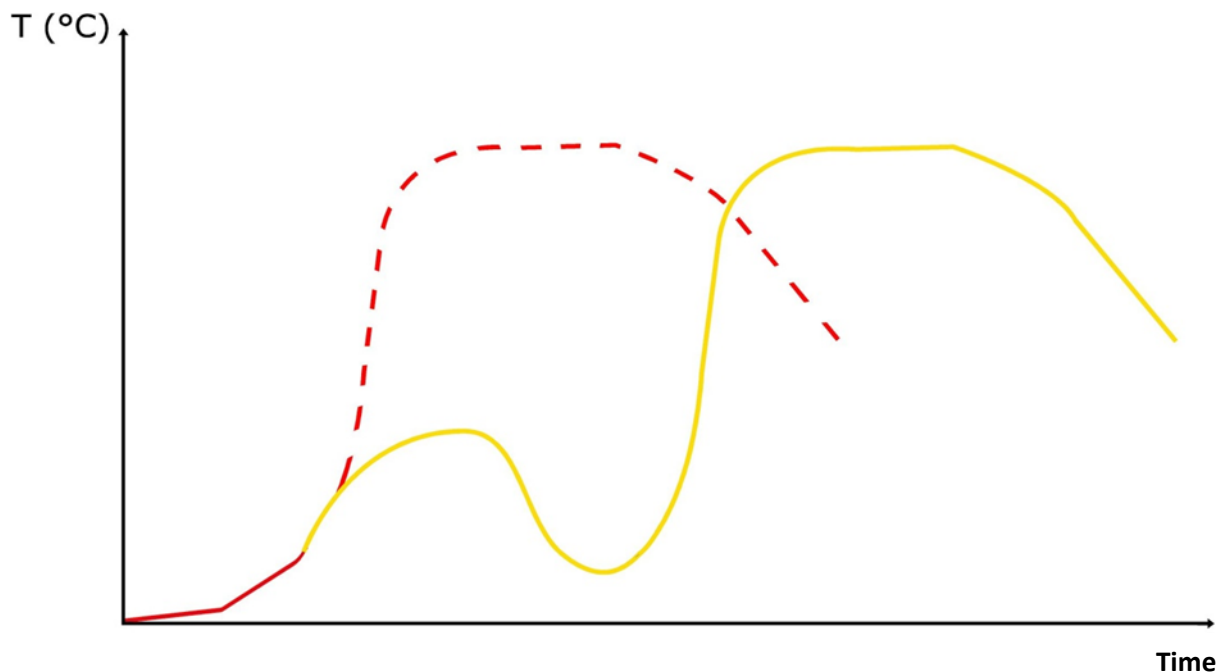


Fig. 1.2 Ventilation induced flashover is yellow (Graph: Karel Lambert)

진압대원에게 이 현상은 큰 위험이 됩니다. 화재실의 출입문을 열면 환기구가 생깁니다. **화재실에 들어가는 것은 화재실을 환기시키는 것입니다!** 따라서 진압대원의 활동은 항상 환기 프로파일에 변화를 주게 됩니다. 이러한 환기는 불난집에 부채질하는 것 입니다. 그림

1.2 에서 시간이 지날수록 노란색 그래프의 기울기가 올라가는 것은 화재실의 온도가 올라가는 것을 보여줍니다. 화재실내의 모든 가스는 점화될 것이고 몇 초 안에 화재는 최성기로 성장할 것입니다. 이 현상의 영향은 일반적인 플래시오버와 유사합니다.

추가된 환기량은 환기유도 플래시오버의 발생속도를 결정합니다. 문이 열리면 공기가 화재실로 밀려들 것입니다. 문 앞에 PPV 팬이 있다면 이 경우 환기유도 플래시오버가 훨씬 더 빨리 발생할 것입니다.

이 현상을 설명하는 데 사용되는 다른 용어로는 "지연된 플래시오버(delayed flashover)"와 "열폭주(thermal runaway)"가 있습니다. 국제적인 수준에서는 "환기유도 플래시오버(Ventilation induced flashover)"라는 용어가 선호됩니다.

1.3 Comparison of both kinds of flashover

다음은 두 가지 플래시오버의 유형을 비교하여 유사점과 차이점을 살펴보겠습니다. 주된 차이점은 두 현상의 근본적인 원인입니다. 일반적인 플래시오버는 환기가 양호한 화재에서 발생하는 반면, 환기유도 플래시오버는 환기가 불량한 화재에서 발생합니다. 그림 1.3 은 온도에 대한 연료 비율(가스)을 나타내고 있습니다.

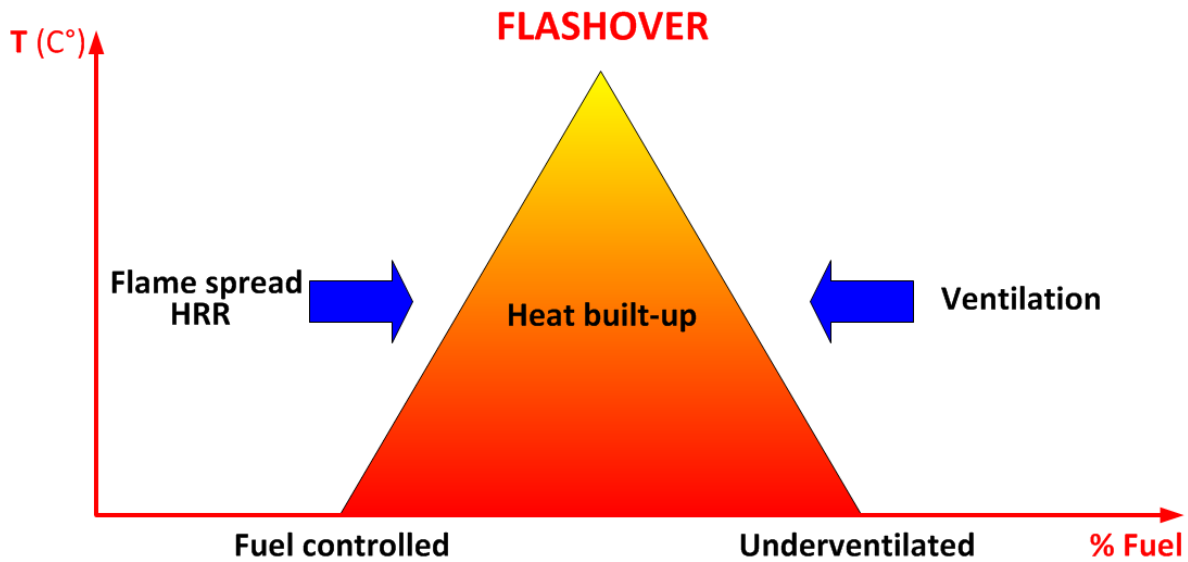


Fig 1.3 Both types of flashover (Graph: Karel Lambert)

그래프의 왼쪽은 우리에게 화재의 시작을 보여줍니다. 여기서 화재는 연료지배형이고 화재는 특정 표면적으로 제한됩니다. 연소 과정에 사용된 가연물은 화재가 플래시오버로 진화할지의 여부를 결정합니다. 열방출률(HRR), 특정 가연물에 의해 에너지가 방출되는 속도, 불꽃 확산, 연료 표면 전체에 걸쳐 불꽃이 팽창하는 속도 등과 같은 매개변수가 화재의 성장을 결정할 것입니다. 충분한 HRR 과 화염이 확대되면 화재는 커지고 실내 온도는 상승할 것입니다. 이를 위해 충분한 연료를 사용할 수 있어야 합니다. 실내에 열이 축적되고 충분한 에너지가 방출되면 플래시오버 현상이 발생합니다. 일부 자료에서는 "열유도 플래시오버(heat induced flashover)" 또는 "복사유도 플래시오버(radiation induced flashover)"라는 용어를 사용하기도 합니다.

그래프의 오른쪽에는 환기가 잘 되지 않는 화재가 그려져 있습니다. 이런 경우, 화재는 꽤 오랫동안 진행되어 있습니다. 충분한 연료를 사용할 수 있지만 필요한 공기가 부족합니다. 환기를 늘리지 않는 한 불은 저절로 꺼질 것입니다. 만약 환기가 발생한다면, 화재성장은 다시 가속화될 것입니다. 실내 온도도 다시 올라갈 것입니다. 일반적인 플래시오버와 마찬가지로 열이 축적됩니다. 이전과 마찬가지로 플래시오버가 발생할 수 있도록 충분한 열이 축적되어야 합니다. 따라서 이러한 종류의 플래시오버는 일반적인 플래시오버와 마찬가지로 열을 필요로 합니다. 열 축적 시작은 환기 프로파일의 변경으로 인해 발생합니다. 따라서 이 현상은 "환기유도 플래시오버"로 정의됩니다.

요약하면 일반적인 플래시오버는 연료지배형 화재에서 발생하지만 환기유도 플래시오버는 환기되지 않는(환기지배형?) 상태에서 발생합니다.

2. Strategy for safe interventions

과거에, 우리들은 격실화재 현장에서 갑작스러운 화세(fire intensity)의 증가를 알아차리지 못했습니다. 플래시오버가 일어나는 순간, 내부 진압대원들은 살아남을 가능성이 거의 없습니다. 몇몇 나라에서는 화재현장에서 소방관들이 심각한 사고를 당하면 그것을 통해 배우고 또한 더 안전한 현장활동을 하기 위해 철저한 조사가 행해졌습니다. 이 조사의 결과 화재실 안에서 플래시오버가 발생하는 순간 진압대원이 출구에서 1.5m 이상 떨어진 곳에 있다면 살아날 기회가 없다는 것을 알게 되었습니다. 즉, 진압대원이 플래시오버 직후 상황에서는 치명상을 입기 전에 출입구로부터 1.5m 이내의 거리에서만 탈출 할 수 있었습니다. 자연스럽게, 이 거리는 플래시오버 직후 열지옥으로부터 탈출이 가능한 거리입니다. 온도는 600°C 까지 상승하거나 때로는 초과하며 실제로 가시성이 제로가 됩니다. 따라서 현재 안전한 조치를 취할 수 있는 방법이 제한적이라는 결론에 도달하게 되었습니다.

2.1 Don't be there

가장 중요한 전략은 "거기 있지 마라!"입니다. 플래시오버가 임박했을 때 건물 밖으로 나온 진압대원들은 플래시오버 발생으로 인해 사망하지 않을 것입니다. 이 전략은 정확한 화재 평가의 중요성을 강조합니다. 화재역학을 통해 플래시오버가 임박했는지 여부를 추론할 수 있는 다양한 경고 현상을 볼 수 있습니다. 모든 (최고) 현장지휘관은 이러한 징후를 확인하고 필요할 때 즉시 건물밖으로 대피를 명령할 수 있어야 합니다. 이 분야에 대한 교육훈련은 현재 심각하게 부족한 상태입니다.

2.1.1 Warning signs for flashover

소방관은 화재를 정확하게 읽고 플래시오버 발생이 가능한지 여부를 평가하는 것이 중요합니다. Shan Raffel 이 디자인하고 Ed Hartin 이 추가로 개발한 B-SAHF 모델은 이 상황평가에 유용한 도구가 될 수 있습니다. 플래시오버가 발생할 가능성이 임박했음을 나타내는 여러 가지 징후가 있으며, 이 징후가 관찰될 때에는 진압대원의 대피를 시작해야 합니다.

- 연기층이 빠르게 하강거나 바닥과 매우 가까워 졌을 때
- 연기층이 짙은 검은색이거나 흰색-회색에서 짙은 검은색으로 변할 때
- 연기층의 움직임이 매우 역동적으로 변할 때
- 연기층의 열기가 강렬해지고 참을 수 없게될 때
- 화염의 영향을 받지 않던 물건들이 격렬하게 열분해할 때(하얀색 수증기가 보일 때?)

2.2 Preventing flashover

플래시오버의 원인은 잘 알려져 있습니다. 일반적인 플래시오버와 환기유도 플래시오버 현상 모두 연기층에 열이 축적된 것으로 시작됩니다. 일반적인 플래시오버의 경우 산소가 충분한 화재에 연료(열분해가스)가 더 추가되어 발생합니다. 환기유도 플래시오버의 경우는 연료가 충분한 화재에 산소를 추가로 공급함으로써 발생합니다.

2.2.1 Cooling of smoke gases (gas-cooling)

성장기 단계의 화재에서 일반적인 플래시오버를 예방하기 위한 가장 성공적인 방법은 가스를 냉각(gas-cooling)시키는 것입니다. 이 기술은 3D 주수기법을 사용합니다. 이 주수기법의 목표는 연기층을 냉각시키고 연기층을 불활성화(inerting, 질식효과)시키는 것입니다. 이러한 목표를 달성하려면 관찰팁의 각도(cone angle)를 약 60°로 설정하고 분무주수를 실시해야 합니다. 그런 다음 연기층에 슛펄싱을 실시합니다. 이렇게 함으로써, 많은 수의 물방울이 연기층으로 들어갈 것입니다. 이 물방울들의 증발은 연기로부터 많은 열 에너지를 빼앗을 것이고, 이것은 연기층의 온도를 떨어뜨리게 할 것입니다. 많은 물방울들이 연기층에 주수될 때, 플래시오버를 불가능하게 할 정도로 연기층의 온도를 낮게 유지할 수 있습니다. 이 기법의 또 다른 장점은 수증기를 연기층에 섞는 것입니다. 수증기는 불연성 가스입니다. 결국 롤오버(roll-over)는 연기 속에 존재하는 수증기로 인해 방해받을 것입니다. 연기층을 불연성 층으로 만드는 것을 불활성화(inerting)라고 합니다.

2.2.2 Anti-ventilation

환기유도 플래시오버의 경우, 이를 예방하기 위해 반배연(anti-ventilation) 기술을 사용하는 것이 해결책이 될 수 있습니다. 반배연이란 화재실의 개구부를 막아서 화재실로 공급되는 공기를 차단하는 것을 말합니다. 환기가 잘 되지 않는 화재는 산소 부족으로 화재는 결국 소멸될 것입니다. 실제로는 반배연 기술을 적용하는 것이 항상 가능한 것은 아닙니다. 화재실 내외부의 온도 차이 때문에 화재실의 유리창 중 하나가 깨질 수도 있습니다. 미국과 캐나다에서는 환기차단의 가능성, 특히 바람의 영향을 확인하기 위한 실험이 수행되었습니다. 풍속이 빠른 경우 바람 제어장치(WCD: Wind Control Devices)를 사용할 수 있습니다. 간단히 말해서 이것은 일종의 내화 캔버스로 창문을 덮어 공기를 차단하는 것을 의미합니다.

3. Case: the Stardust disco fire

1981년 1월 14일 영국 더블린의 스타더스트 나이트클럽에서 화재가 발생했습니다. 화재 당시 나이트클럽에는 841명의 사람들이 있었고 화재는 큰 격실의 폐쇄된 구역에서 시작되어 플래시오버로 매우 빠르게 성장했습니다. 이 플래시오버로 인해 화재는 나이트클럽의 나머지 부분으로 번졌습니다. 그날 밤 48명이 죽고 214명이 부상당했습니다. 이 플래시오버는 많은 사상자를 낸 중요한 원인이었습니다. 이 화재현장에서는, 화재 예방과 관련된 조치는 거의 행해지지 않았습니다. 벽의 마감재와 벤치는 인화성이 매우 강했고 소화기는 거의 찾아볼 수 없었으며 몇몇 비상구는 잠겨 있었습니다.

3.1 The building

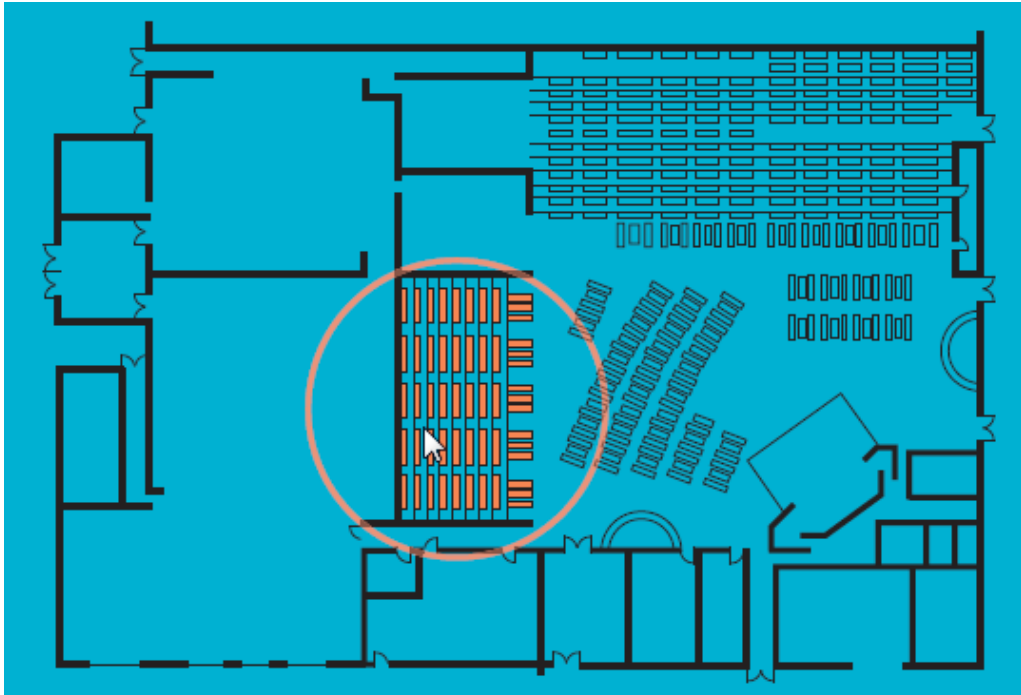


Fig 3.1 Floor layout of the disco (Image: Bo Andersson)

이 나이트클럽은 여러 개의 공간들로 이루어진 복합적인 구조물에 있었습니다. 나이트클럽 안에는 여러 개의 경사형 관람열(niches)로 둘러싸인 중앙에 댄스 플로어 구역이 있었습니다. 이 관람열에는 장식된 관람석(benches) 비치되어 있었습니다. 그림 3.1 에 이에 대한 개요도가 그려져 있습니다. 화재가 발생한 중앙 관람구역(niches) 지역이 강조되어 있습니다. 중앙 관람열의 넓이는 약 17m, 깊이는 약 10m 였다. 벤치는 경사면에 설치되었고, 50mm 의 PVC 와 폴리우레탄 폼으로 마감이 되어있었습니다. 그림 3.2 는 어떤 종류의 커튼이 중앙 구역과 관람구역을 차단하는 것이 가능했다는 것을 보여줍니다. 이 커튼은 나이트클럽의 크기를 참석 인원 에 맞게 조절할 수 있게 했습니다. 커튼은 가연성 물질로 구성되었으며, 이 경우 마감재로 PVC 와 폴리에스테르가 사용되었습니다.

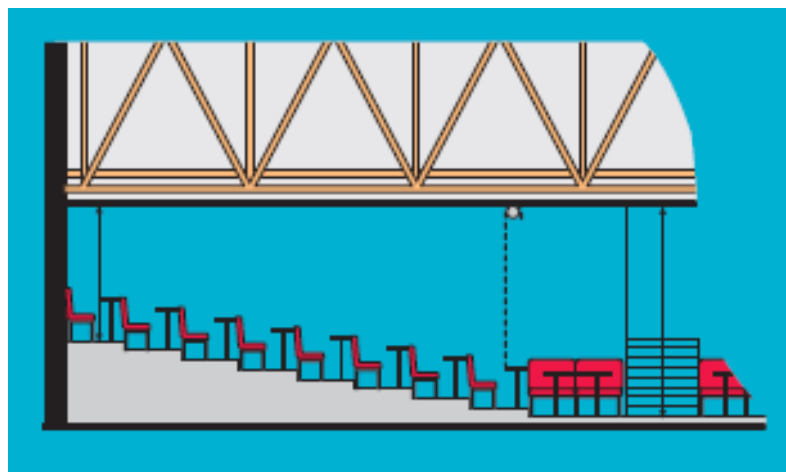


Fig 3.2 Sectional view of the niche. The dotted vertical line indicates the position of the curtain. (Image: Bo Andersson)

뒷벽과 옆벽은 폴리에스테르 타일로 만든 가연성 마감재로 덮여 있었습니다. 관람구역의 천장은 단열되어 있었습니다. 천장에 단열재가 있었기 때문에 열이 댄스 플로어 중앙으로 향하도록 하였습니다.

3.2 The fire

화재는 관람구역의 뒤쪽에서 시작되었습니다. 참석한 입장객들 중 아무도 처음의 작은 화재에 놀라지 않았습니다. 나이트클럽 직원들은 자체진화하기로 결정했습니다. 직원들은 자체진화가 실패한 후에야 소방서에 신고하였습니다. 입장객들도 처음에는 나이트클럽에 남아 구경하는 쪽을 택했습니다. 때문에 건물 대피가 너무 늦게 시작 되었습니다.

어느 틈엔가 한 직원이 관람구역과 중심 구역을 구분하는 커튼을 열었습니다. 연기의 흐름은 커튼이 있었던 곳까지 제한되어 있었지만 커튼을 열고 난 후 불길이 급속히 커졌습니다. 플래시오버가 일어난 후, 관람구역의 뜨거운 연기가 중심 구역으로 유입되고 있었습니다. 그 후 화재현장은 곧 공포에 휩싸였습니다.

3.3 The flashover

사망자가 많아 이 화재에 대한 철저한 조사가 이루어졌습니다. 영국 국립(왕립?) 건설연구소 (BRE: Building Research Instrument)에서는 실제 규모의 화재실험을 통해 철저한 실험연구를 수행 하였습니다. 화재가 시작된 관람구역에 나이트클럽에 놓여 있던 것과 동일한 벤치와 탁자를 비치하였습니다. 필요한 장비가 설치되었고 화재를 발생시켰습니다. 전체 실험 과정이 촬영되었으며, 축소된 버전의 동영상을 유튜브에서 확인 할 수 있습니다. 그 영상은 관람구역의 화재성장을 잘 보여줍니다. 특히 플래시오버의 단계가 분명하게 보입니다. 원래 저는 이 글에서 영상의 이미지를 제공하고 싶었지만, BRE의 허락을 받을 수 없었습니다. 추가 자료를 찾고 싶은 분들은 www.youtube.com 을 방문하여 "stardust disco fire"로 검색하시면 볼 수 있습니다. 검색 결과 가장 상위에 50 초 정도의 짧은 동영상을 찾을 수 있을 것입니다. 우리는 플래시오버의 강력한 특성을 확인하기 위해 여러 번 이 동영상을 보고 검토할 가치가 있습니다. 이 동영상은 또한 플래시오버가 몇 초 동안 지속되는 현상이라는 것을 보여줍니다.

영상 시작 5 초 만에 관람구역 벤치 5 개의 열 중에서 4 개의 열은 여전히 선명하게 보입니다. 5 번째 열의 벤치가 불타고 있습니다. 이 화재는 바닥에만 제한되어 있습니다. 이미 짙은 회색의 연기층이 형성되었습니다. 영상 시작 약 9 초 만에 3 번째 열의 벤치의 좌석이 열분해를 일으키기 시작하고 있는 것으로 보여집니다. 그 후 8 초 후에 두 번째 열의 벤치가 열분해되기 시작하고 다시 2 초 후에 첫 번째 열의 벤치가 열분해되기 시작합니다. 24 초 가 지나자 맨 앞 테이블의 재떨이에 불이 붙었습니다. 내부에서 플래시오버가 발생한 것입니다. 지난 19 초 동안 화염은 뒷벽에서 관람구역 쪽으로 이동해 왔습니다. 연기의 색은 짙은 회색에서 짙은 흑색으로 바뀌었습니다. 29 초 이후부터는 뜨거운 화재가스가 어떻게 흘러나오는지, 관람구역을 벗어나자 어떻게 불이 번져가는지를 보여줍니다. 실제 화재에서 이 열연기의 흐름은 중앙 댄스 플로어 구역으로 향하고 있었습니다. 이 현상이 일어난 놀라운 속도와 중심 구역에 유입된 엄청난 양의 열연기는 많은 수의 사상자를 낳았습니다.

4. Bibliography

- [1] *Drysdale Dougal, An introduction to fire dynamics, 2nd edition, 1998*
- [2] *Bengtsson Lars-Göran, Enclosure Fires, 2001*

- [3] *Grimwood Paul, Hartin Ed, Mcdonough John & Raffel Shan, 3D Firefighting, Training, Techniques & Tactics, 2005*
- [4] *Lambert Karel & Desmet Koen, Binnenbrandbestrijding, versie 2008 & versie 2009*
- [5] *Hartin Ed, www.cfbt-us.com*
- [6] *Report of the independent examination of the stardust victims committee's case for a reopened inquiry into the stardust fire disaster*
- [7] *Raffel Shan, www.cfbt-au.com*
- [8] *Mcdonough John, New South Wales Fire Brigade, personal communication , 2009*
- [9] *Lambert Karel, Brandgedrag, 2010*
- [10] *Gaviot-Blanc, Franc, www.promesis.fr*
- [11] *International Fire Instructor Workshop (IFIW), group conversation, 2010*
- [12] *Kerber Steve, Impact of ventilation on fire behavior in legacy and contemporary residential Construction, 2011*

5. Author's note

개인적으로 저는 앞으로 벨기에 사례들에 대해서도 논의하는 것이 좋을 것이라고 생각합니다. 벨기에에서도 급속한 화재성장 현상이 증가하고 있다는 느낌이 들었습니다. 만약 당신이 극단적인 화재행동을 보이는 화재 현장을 경험했다면, 당신은 언제나 나에게 (아마도 이미지와 함께) 사실을 포함하는 보고서를 이메일로 보내주시면 됩니다.

karel.lambert@skynet.be

Karel Lambert