When water goes up in smoke

1 Introduction

네덜란드 공공 안전 연구소(Institute for Physical Safety/Instituut Fysieke Veiligheid)는 소방학교를 산하에 두고 있으며, 소방 조직을 위한 교육 및 학습 자료를 체계적으로 관리·감독하는 역할을 수행한다. 본 기관은 (벨기에 기준으로) 수십 명의 전문 인력이 근무하는 비교적 대규모 조직으로, 소방서가 대응해야 하는 다양한 재난 및 사고 상황에 대해 충분한 준비 태세를 갖추도록 지원한다. 한편, 네덜란드 공공 안전 연구소에서는 화재진압 활동과 관련하여 가스 냉각(gas cooling)에 관한 연구를 2021 년 12 월에 발표하였다[1].

본 연구에서는 두 가지 관창 (주수) 기법(nozzle techniques), 즉 '3D 펄싱 기법(3D pulse method)'과 '아크 기법(arc method)'을 비교 하였다. 이 중 아크 기법은 벨기에에서는 알려져 있지 않은 방식이다. 본 연구의 목적은 화재 가스 냉각(smoke gas cooling) 측면에서 각 기법의 효과를 평가하는 데 있다.

벨기에에서 가스 냉각(gas cooling) 전술은 상당한 발전을 이루어 왔다. 해당 개념은 약 2004 년경에 도입되었으며, 당시 소방관 교육 과정의 교재에는 '관창 주수 기법(nozzle techniques)'이라는 용어 자체가 사용되지 않았었다. 그 시기에 교육되던 주수 기법은 현재의 분류 기준으로 볼 때 '숏 펄싱(short pulse)' 기법에 해당한다.

시간이 지나면서 가스 냉각 주수 기법에 대한 이해가 점차 깊어졌다. 그 결과, 숏 펄싱(short pulse) 기법에는 한계가 있으며, 가스 냉각은 롱 펄싱(long pulse) 기법을 통해 더 효과적으로 수행된다는 것이 명확해졌다. 2012 년에 가스 냉각의 대안적 방법을 설명한 글을 필자(Karel Lambert)[1]가 발표하였다[2]. 한편, 스웨덴에서는 환기 지배형 화재 상황에서 화재 가스를 냉각하기 위해 아크 형태의 주수 기법(arc-shaped method)이 활용되고 있었다.

해당 글이 발표된 지도 어느덧 약 10 년이 경과하였다. 그 사이 가스 냉각 주수 기법 역시 지속적으로 발전해 왔다. 미국에서는 아크 기법의 대안적 운용 방식에 대한 새로운 접근법이 제시되었다. 이에 따라 네덜란드 소방학교는 기존의 3D 펄싱(3D pulsing) 기법과 미국식 아크 기법(American arc method)을 비교하는 연구를 수행하였다. 다만, 이 연구에서는 숏 펄싱은 사용하지 않고 롱 펄싱만을 적용하였다.

[1] 이하 본 필자는 'Karel Lambert' 이다

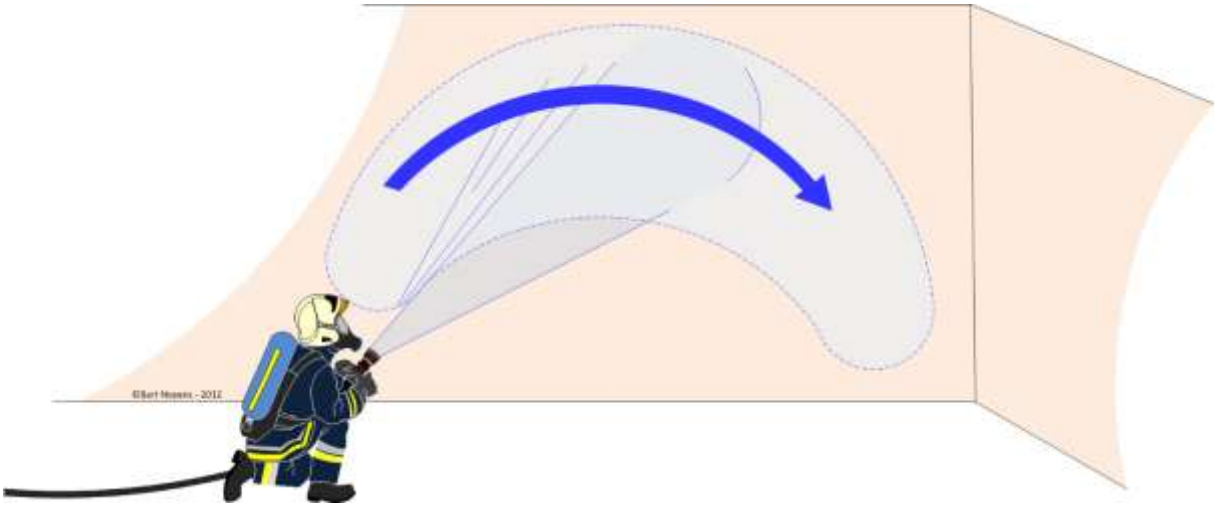

Image 1 The nozzle man is cooling the smoke in an under-ventilated fire. He opens the nozzle and moves it in the shape of an arc from left to right. The full movement should not take longer than three seconds. *(Image: Bart Noyens from[2])*

네덜란드의 연구진은 다음과 같은 관점을 제시하였다:
"3D 가스 냉각 기법은 지나치게 복잡하여 이를 정확하게 교육하는 데 많은 시간이 소요된다. 이러한 복잡성으로 인해 실제 현장에서의 활용 빈도는 매우 낮다."

필자는 2007 년부터 소방관 교육에 적극적으로 참여해 왔다. 지난 14 년간 벨기에에서는 소방관 교육의 질을 향상시키기 위해 많은 사람들이 상당한 노력을 지속적으로 기울여 왔다.

그 결과, 상당한 진전이 이루어졌다고 평가할 수 있다. 하지만 이는 동시에 가스 냉각을 다루는 방식에 있어 필자에게 일정한 편향(또는 선호)이 존재함을 의미하기도 한다. 필자는 네덜란드 연구진이 시험한 방법과는 다소 다른 변형된 형태이기는 하나, 펄싱 방식의 가스 냉각 기법을 습득하고 발전시키는 데 14 년간 투자해 왔다. 본 글에서는 가능한 한 객관적인 관점을 유지하고자 하였으며, 그 성과에 대한 평가는 독자의 판단에 맡기고자 한다.

2 The Research

네덜란드 연구진이 수행한 본 연구는 매우 체계적이고 면밀하게 이루어졌다. 연구진은 서로 다른 주수 기법들을 방법론적으로 비교하고자 하였으며, 비교 가능한 결과를 도출하기 위해 여러 가지 선택을 할 수밖에 없었다. 이러한 각각의 선택에 대해서는 비판이 제기될 수 있다. 선택을 한다는 것은 곧 일부를 포기하는 것을 의미한다. 이와 같은 유형의 연구에서는 추가적인 연구의 필요성이 거의 항상 타당하게 지적된다. 그러나 예산은 무한하지 않으며, 이 점에서도 불가피하게 선택이 요구된다.

독자는 이러한 선택의 한계가 과학적 방법론에 본질적으로 내재된 특성임을 인식할 필요가 있다. 연구는 일정한 절차와 체계에 따라 수행되어야 하며, 그래야만 측정된 결과를 바탕으로 타당한 결론을 도출할 수 있다. *만약 실험 과정에서 각 참여자가 임의로 행동할 수 있도록 허용된다면, 이러한 결론 도출은 불가능해질 것이다.*

Image 2 The tested set-up: A corridor of 20 meters long with a shipping container on the right hand top side. *(Picture: IFV)*

이하에서는 네덜란드 연구진이 선택한 연구 방법과 그 결과를 벨기에의 입장에서 설명하고자 한다. 이는 결코 해당 연구의 질을 문제 삼으려는 의도가 아니다. 오히려 네덜란드의 연구 보고서는 새로운 지식과 통찰을 제공하며, 이에 대해 연구진은 충분한 평가와 찬사를 받을 자격이 있다고 필자는 판단한다. 해당 연구 보고서는 총 140 쪽에 달하는 분량으로 구성되어 있으며, 따라서 본 글에서 다루는 내용은 보고서 전체 중 일부에 불과하다는 점을 독자가 인지할 필요가 있다.

2.1 Set-up

연구를 위해 L 자 형태의 구조물이 제작되었다. 구조물 긴 구간(long section)의 벽체는 규산 칼슘 벽돌(sand-lime brick)로 시공되었으며, 천장은 콘크리트 블럭(concrete vaults) 구조로 구성되었다[2]. 짧은 구간(short section)은 해상 운송용 컨테이너를 활용하여 제작되었고[3], 그 크기는 2.4 × 2.4 m 이다.

L 자 구조물의 긴 구간은 길이 20 m, 폭 2 m 로 복도를 모사하도록 설계되었다. L 자 구조의 짧은 구간에는 6~8 MW 규모의 대형 화재실(large room fire)를 재현하는 화점실이 설치되었다. 이 화점실에서 발생한 고온의 화재 가스는 복도로 유입되며, 진압대는 해당 복도를 따라 화점(seat of the fire)까지 진입하는 시나리오로 설정되었다. 모든 소방호스 연장(deployment)은 숙달된 소방대원들에 의해 수행되었다. 이로 인해 복도 내에는 동적인 연기층(dynamic smoke layer)이 형성되었고, 고온의

[2] 이러한 재료들은 비교적 큰 열용량과 열관성을 가지며, 화재 시 열 축적 및 복사열 형태가 실제 건축물과 유사하게 나타나도록 설계되었다.

[3] 강재로 구성된 이 구간은 적은 열용량과 높은 열전도도를 특징으로 하여, 실험 조건에 따라 내부 온도 변화가 보다 빠르게 나타나는 특성을 가진다.

화재 가스가 지속적으로 복도를 통해 유출되는 조건이 만들어졌다. 이러한 동적 연기층은 최악 조건(worst-case scenario)으로 간주되었으며, 실험 중 측정된 최대 온도는 약 450 °C 에 이르렀다.

본 연구에서는 다양한 물리량을 측정하였으며, 이 중 본 글의 분석 대상과 가장 밀접한 변수는 온도이다. 네덜란드 연구진은 주수 기법에 의해 발생하는 냉각 효과를 정량적으로 평가하기 위해 온도 변화(온도 차이)를 주요 지표로 활용하였다.

네덜란드 연구진은 복도를 높이에 따라 여러 구역으로 구분하였다(그림 3 참조). 각 구역에서는 복도(출입문) 입구로부터 2 m, 7 m, 12 m, 17 m 지점에서 일정한 간격으로 온도를 측정하였다. 이를 통해 고온 구역과 저온 구역 모두에서 에너지 감소 및 에너지 증가 양상을 분석할 수 있었다.

Image 3 Dividing of the corridor into different zones. The height corresponding to the zones is shown above. *(Picture: [1])*

본 연구에서는 서로 다른 관창 주수 기법과 유량 조건을 비교하였다. 분석 대상이 된 유량은 다음과 같다:

- **고압(High pressure)**: 네덜란드 기준에서 유량 119 L/min 에 해당
- **저압(Low pressure)**: 유량 250 L/min
- **저압(Low pressure)**: 유량 450 L/min
- **가압 공기 포말(Pressurized Air Foam)**: 유량 130 L/min 의 CAFS(Compressed Air Foam System)

벨기에에서는 고압 시스템이 일반적으로 더 높은 유량(180 L/min)으로 운용된다. 따라서 본 글에서는 해당 연구에서 제시된 고압 조건의 실험 결과를 분석 대상에서 제외하였다. 또한 가압 공기 폼(pressurized air foam/CAFS)은 벨기에에서는 활용 빈도가 매우 낮으며, 현지 운용 환경을 고려할 때 이를 적용할 실질적인 필요성도 크지 않다. 이러한 이유로 본 글에서는 해당 실험 결과 역시 분석 대상에서 제외하였다.

본 연구에서는 두 가지 관창 주수 기법을 비교하였다:

- **화재 가스 냉각을 위한 롱 펄싱 적용 기법**: 본 글에서는 이를 "3D" 기법으로 정의하였다. 구체적으로는 펄싱당 관창 개방 시간은 3 초이며, 이동 과정에서 매 3 m 마다 정지하여 이러한 펄싱을 1 회 적용하는 방식이다.
- **아크 기법(arc method)**

두 가지 주수 기법 모두 '4 인 1 호스(four on one hose)' 배치 방식으로 수행되었으며, 소방 호스 전개는 네 명의 소방대이 협력하여 이동하는 방식으로 이루어졌다.

벨기에의 운용 현실을 고려할 때, 화재 가스 냉각에는 450 L/min 의 유량이 사용되지 않는다. 실제 현장에서 적용되는 유량은 250 L/min 에 근접한다.

2.1.1 The arc method

미국식 아크 기법(American arc method)은 시애틀 소방국(Seattle Fire Department)의 Aaron Fields 가 개발한 이동 전술의 결과물이다. 그들은 "The Nozzle Forward"라는 개념 아래 체계적인 이동 방법을 발전시켰다. 이 전술은 여러 구성 요소로 이루어져 있으며, 그중 하나가 네덜란드 연구진이 "아크 기법(arc method)"이라 명명한 방식이다. 해당 기법은 *"천장–벽–바닥(ceiling–wall–floor)"이라는 반복적인 구호*, 즉 일종의 매뉴얼화된 주수 순서를 기반으로 운용된다.

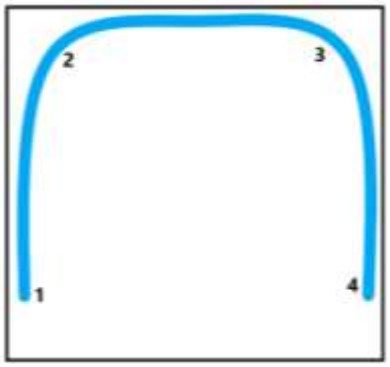

Image 4 The pattern of the arc method:1-2-3-4-3-2-1.
(Drawing: [1])

그림 4.는 아크 기법의 작동 원리를 명확하게 보여준다. 진압대가 내부로 진입한 후 관창을 개방하며, 관창은 직사(full jet) 상태로 설정된다. 주수되는 물방울은 바닥에서 시작하여 벽면을 따라 상승한 뒤 천장을 따라 이동하고, 이어서 실 또는 복도의 반대편 벽을 따라 이동한 후 다시 바닥으로 향한다. 이후 물방울은 동일한 경로를 따라 출발 지점으로 되돌아오는 방식으로 운용된다.

이러한 주수 동작은 지속적인 이동 동작과 결합되어 수행된다. 관창수는 이동하는 동안 아크 기법을 연속적으로 적용한다. 미국에서는 이 기법을 직경 65 mm 호스와 약 800 L/min 의 유량으로 운용하고 있는데, *이는 매우 효과적일 수는 있으나 효율성 측면에서는 재검토의 여지가 있다.* 한편, 네덜란드 연구진이 본 연구에서 시험한 최대 유량은 450 L/min 이었다.

2.2 Results

본 연구를 통해 두 가지 매우 중요한 결론이 도출되었다:

- 모든 주수 기법은 화점으로 이동 하는 과정에서 화재 구역에 대해 일정 수준의 냉각 효과를 제공하는 것으로 확인되었다.

- 조사된 모든 화재 가스 냉각 기법에서 안전한 작전 수행을 위한 한계 기준값은 초과되지 않았다. (연구에서 적용된 모든 화재 가스 냉각 기법은 진압대원의 안전한 내부 진입 및 이동 과정을 저해할 수준의 열적 한계를 초과하지 않았다.)

따라서 화재 가스 냉각은 그 주수 기법과 무관하게 효과적으로 작동함이 확인되었다. 연기층의 온도가 최대 450 °C 에 도달하는 조건에서도, 진압대원의 안전을 위협하지 않고 6~8 MW 규모의 화재 환경에서도 약 20 m 의 이동 작전을 수행하는 것이 가능함이 입증되었다.

2.2.1 Thermal inversion

네덜란드 연구는 '구역 모델(zone model)'에 기반한 가설 하에 수행되었다. 이는 실내 공간을 두 개의 구역으로 구분하는 개념으로, 상부에는 고온 구역(hot zone), 즉 연기층(그림 5.의 회색 영역)이 형성되고, 하부에는 저온 구역(cold zone), 즉 비교적 차가운 공기만 존재하는 영역(그림 5.의 흰색 영역)이 위치한다. 구역 모델에서는 각 구역이 하나의 대표 온도를 갖는다고 가정하며, 상부는 고온, 하부는 저온 상태로 정의된다. 이때 연기층의 하단은 두 구역을 구분하는 경계면을 형성한다.

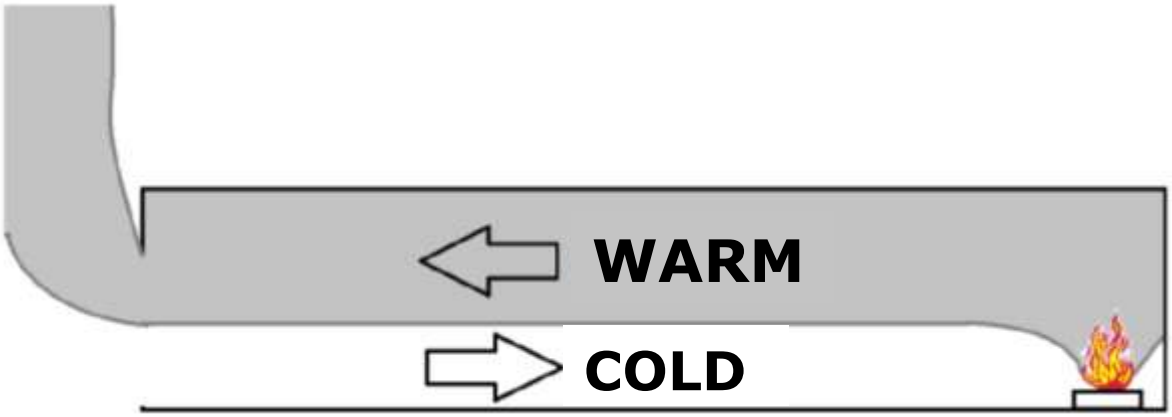

Image 5 *Schematic representation of a zone model: The smoke layer is considered hot and below there is only air which is considered as cold. (Drawing: [1])*

본 연구의 중요한 결과 중 하나는 저온 구역(cold zone)의 온도가 상승하지 않거나, 상승하더라도 그 정도가 매우 제한적이라는 점이다. 즉, 열층 역전(thermal inversion)은 발생하지 않았다. 이러한 현상은 펄싱 방식의 가스 냉각 기법에 대해서는 이미 알려져 있었으나, 본 연구를 통해 아크 기법에서도 동일하게 적용됨이 확인되었다. 이는 아크 기법이 상부의 고온 화재 가스를 하부의 저온 구역과 대규모로 혼합시킬 것이라는 기존의 예상과는 상반되는 결과이다. 실제로는 그러한 혼합 현상은 관찰되지 않았다.

2.2.2 Length of the cooled zone

본 연구에서는 가스 냉각이 이루어지는 구역의 범위 또한 비교·분석하였다. 펄싱 기법에 의해 냉각되는 구역의 길이가 제한적이라는 점과, 주수에 의해 냉각된 가스가 비교적 빠르게 사라진다는 점은 이미

알려져 있었다. 본 연구는 이러한 현상을 실제로 계측하여 정량화하였다. 가스 냉각 효과는 진압대 전방 구역뿐만 아니라 진압대 후방 구역에서도 분석되었으며, 그 결과 다음과 같은 결과가 도출되었다:

Name	**Forward cooling**	**Backward cooling**
LP 250 3D-pulse	6 m	>17m
LP 250 arc	9 m	>17m
LP 450 3D-pulse	6 m	9 m
LP 450 arc	15 m	>17m

이 결과는 아크 기법이 3D 펄스 기법에 비해 화재 가스를 더 먼 거리까지 냉각시키는 효과를 가진다는 점을 보여준다. 이러한 차이는 특히 유량이 450 L/min 일 때 더욱 두드러지게 나타났다.

2.2.3 Differences between the 3D- and the arc method

그림 6.은 유량 250 L/min 조건에서 아크 기법("half moon")이 3D 기법보다 더 우수한 성능을 보여주는 것을 나타낸다. 해당 그림에는 복도 입구로부터 2 m, 7 m, 12 m, 17 m 지점에서 측정된 온도 분포가 제시되어 있다. 실험 과정에서 진압대는 복도 시작 지점에서 끝 지점까지 이동하였으며, 이에 따라 냉각 작용 역시 실험 동안 0 m 지점에서 20 m 지점으로 이동하는 양상을 보였다.

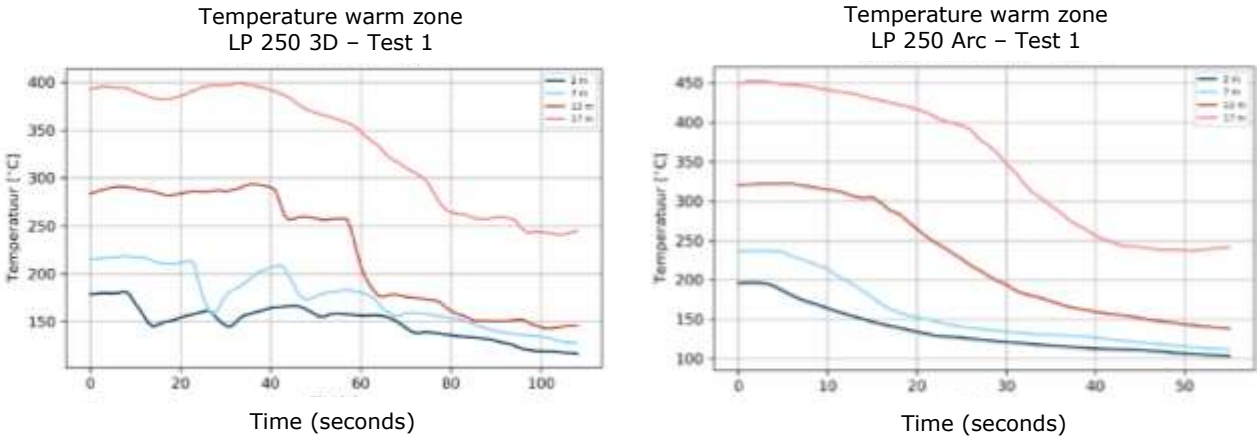

Image 6 Comparison between the 3D-method and the arc method with a flow rate of 250 LPM. The temperature is shown at 2, 7, 12 and 17 m from the entrance of the hallway. Please note that the temperature scale is not the same for both graphs. *(Drawing: [1])*

그림 7.은 유량 450 L/min 조건에서 수행된 동일한 분석 결과를 보여 준다. 이 경우에도 유사한 결론을 도출할 수 있으며, 아크 기법은 3D 기법에 비해 더 큰 냉각 효과를 보일 뿐만 아니라, 더 먼 거리까지 화재 가스를 냉각시키는 것으로 나타났다.

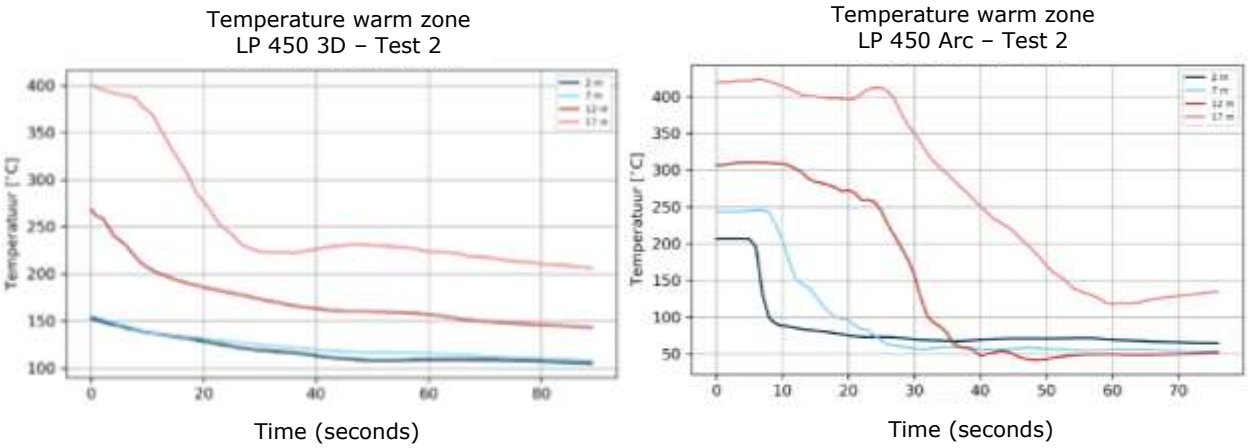

Image 7 Comparison between the 3D-method and the arc method with a flow rate of 450 LPM. The temperature is shown at 2, 7, 12 and 17 m from the entrance of the hallway. Please note that the temperature scale is not the same for both stats. (Drawing: [1])

그러나 아크 기법의 진정한 '이점(gain)'은 유량 250 L/min 의 3D 기법 그래프와 유량 450 L/min 의 아크 기법 그래프를 비교할 때 가장 뚜렷하게 나타난다. 이 경우 아크 기법의 화재 가스 냉각 효과가 현저하게 큰 것으로 확인되었다.

본 연구는 또한 3D 펄싱 기법 효과의 편차가 아크 기법에 비해 더 크게 나타난다는 점을 보여준다. 이는 아크 기법이 3D 펄싱 기법에 비해 숙련도에 따른 효과의 편차가 적으며, 보다 일관되게 정확한 수행이 가능함을 의미한다.

본 연구 결과로부터 아크 기법을 적용한 경우가 3D 펄싱 기법을 적용한 경우보다 진압대원의 이동 속도가 더 빠르다는 점을 간접적으로 도출할 수 있다. 구체적으로, 유량 450 L/min 의 아크 기법은 이동에 75 초가 소요된 반면, 유량 250 L/min 의 3D 기법은 110 초가 소요되었다.

반면, 실험 참가자들은 아크 기법을 적용할 때 3D 펄싱 기법에 비해 더 큰 불편함과 부담을 경험한 것으로 보고하였다. 즉, 유량 450 L/min 을 지속적으로 방수하면서 호스를 이동시키는 것은 신체적으로 더 큰 노력을 요구한다. 이러한 결과는 해당 기법이 효과적으로 적용되기 위해서는 충분한 반복 훈련이 필수적임을 시사한다.

네덜란드 연구진은 또한 다음과 같은 결론을 도출하였다:
3D 펄싱 기법이 표준 운용 기법으로 교육되고 있음에도 불구하고, 영상 분석 결과 아크 기법이 3D 펄싱 기법에 비해 수행이 용이하며, 관창수의 숙련도에 대한 의존도가 더 낮은 것으로 나타났다.

2.2.4 General conclusion

본 연구의 종합적인 결론은 다음과 같다:

본 연구 결과에 따르면, 아크 기법과 3D 펄싱 기법은 모두 화재 가스를 냉각하는 데 효과적인 방법임이 확인되었다. 다만, 아크 기법은 3D 펄싱 기법에 비해 더 큰 냉각 효과를 제공할 뿐만 아니라, 교육 및 현장 적용 측면에서도 상대적으로 용이한 것으로 평가되었다.

3 Concerns

본 장에서는 해당 연구와 그로부터 도출된 결론에 대해 몇 가지 비판적 고찰을 제시하고자 한다. *"어리석은 자 한 사람이 현자 천 명이 답하기 어려운 질문을 던질 수 있다."*는 속담이 이를 잘 설명한다. 물론 필자가 모든 지식을 독점하고 있다고 주장하는 것은 결코 아니다. 사후적으로 비판적 질문을 제기하는 일은 연구를 수행하는 과정에서 모든 요소를 사전에 고려해야 하는 연구진의 입장보다 훨씬 수월하다는 점 또한 분명히 인식하고 있다.

또한 본 고찰은 벨기에의 운용 환경을 바탕으로 제시된다. 벨기에의 소방 전술은 네덜란드에 비해 다소 공격적인 성향을 보이며, 내부 공격(interior attack)은 여전히 표준 작전 방식으로 유지되고 있다. 아울러 벨기에에서는 비교적 대형 건축물에 대해서도 내부 공격을 전개하는 반면, 네덜란드의 경우 유사한 상황에서 보다 신속하게 방어적 전략(defensive strategy)으로 전환하는 경향이 있다. 이러한 차이는 내부 진압 전술을 바라보는 관점에서 중요한 맥락적 차이로 작용한다.

본 연구는 소방 전술에 관한 기존 지식 체계에 매우 중요한 기여를 하고 있다. 과학적 연구의 목적은 해답을 도출하는 데 있으나, 새로운 해답은 대체로 새로운 질문을 동반한다. 이하에서는 추가적인 연구를 통해 해명이 필요하다고 판단되는 몇 가지 질문을 제시하고자 한다.

3.1 Too complex

네덜란드 연구진은 3D 기법이 지나치게 복잡하여 교육이 어렵다고 주장한다. 개인적으로 필자는 이 주장이 충분히 설득력이 있다고 보지 않는다. 해당 기법은 관창을 목표 지점에 조준한 후 개방과 폐쇄를 수행하는 방식으로 이루어지며, 그 자체로 특별히 복잡한 동작이라고 보기는 어렵다. 이는 다른 모든 기법과 마찬가지로 반복적인 훈련을 통해 숙달될 수 있는 영역이다. 특히 벨기에의 상황에서는 이러한 주장이 타당한 근거가 되기 어렵다. 벨기에는 G-force 관창이 널리 보급되어 있으며, 현재 사용 중인 모델에는 유량 조절 링(flow rate ring)이 장착되어 있다. 유량 조절 링이 적용된 관창은, 완전 개방 여부만으로 유량을 제어하는 관창에 비해 추가적인 설정 단계를 요구한다는 점에서 운용 복잡성이 더 높다. 그럼에도 불구하고 이미 많은 소방서에서는 이러한 관창을 선택하였고, 이를 적절히 사용하기 위해 추가적인 교육과 훈련을 시행하고 있다. 그렇다면 동일한 논리에서 3D 기법을 적용하는 것 역시 충분히 가능하며, 교육상의 어려움을 이유로 배제할 필요는 없다고 판단된다.

네덜란드 연구진은 3D 기법의 복잡성 때문에 가스 냉각이 충분히 활용되지 않는다고도 언급한다. 이 점에 대해서는 필자 역시 동의한다. 화재 가스 냉각의 불량은 실제로 진압대원의 안전 측면에서 일종의 "위험(reduction/안전수준 감소)"를 초래하며, 이는 결코 용인될 수 없는 문제이다.

이와 관련하여 지휘관(Company Officer)에게 부여된 역할이 있다. 지휘관은 화재 가스가 항상 냉각되도록 노력해야 하며, 이를 위해 담당 출동대를 보다 철저하게 교육 시킬 필요가 있다. 즉, 각 화재 현장에서 화재 가스 냉각을 책임지는 것이 지휘관의 임무임을 명확히 인식하도록 해야 한다.

3.2 What about a static smoke layer?

본 연구는 철저하게 수행되었으나, 물론 한계점도 존재한다. 연구진 자신들도 이를 명시하고 있다:
연구 결과와 결론은 오직 기술된 실험 장치, 화재 하중(fire load), 환기 조건에만 적용된다는 점을 강조한다. 또한 연구진은 연구 결과를 일반화할 때에는 신중을 기해야 한다고 언급하고 있다.

이러한 서술은 연구진의 전문성을 잘 보여준다. 흥미로운 결과를 일반화하여 적용하고 싶다는 유혹이 생기기 쉽지만, 이는 연구를 보다 간단하게 이해하고 활용하려는 심리적 경향일 뿐이다. 현실 세계는 그보다 훨씬 복잡하며, 이러한 단순화는 주의가 필요하다.

본 연구에서는 동적 연기층(dynamic smoke layer)을 최악의 시나리오(worst-case)로 가정하였다. 6~8 MW 규모의 화재는 고온의 연기층을 생성하며, 이러한 화재는 (복도를 통해 연결되었든 아니든) 일반적으로 외부 공기와 접하는 곳에서 발생한다. 고온의 연기층은 화재 발생 지점에서 외부로 신속히 유출되며, 진압대는 이 고온의 연기층 아래에서 화점(seat of the fire)까지 이동해야 한다. 연기층 온도가 450 °C 에 달하는 경우, 진압대에게 중대한 위험이 되는 것은 분명하다.

그러나 이것이 유일한 최악의 시나리오는 아니다. 상대적으로 정적인(stationary) 연기층은 화재 가스 점화(fire gas ignition) 현상을 초래할 수 있으며, 과거 이러한 상황에서 다수의 진압대원이 부상을 입은 사례가 있다. 이는 동적 연기층과는 본질적으로 다른 상황이다. 예를 들어, 모든 창문과 문이 닫힌 상태의 환기 지배형 화재(under-ventilated fire)를 고려해 보자. 이 경우 연기층의 온도는 비교적 낮고, 연기 흐름 또한 제한적이다.

따라서 최악의 시나리오(worst-case scenario)는 두 가지로 나눌 수 있다. IFV(네덜란드 공공안전 연구소) 연구에서는 그중 한 가지 상황을 대상으로 조사하였다. 그러나 두 번째 시나리오 또한 반드시 고려되어야 한다. 연구진은 보고서에서 다음과 같이 언급하고 있다.

"공간이 닫힌 상태로 유지되는 정적 연기층(stationary smoke layer)을 대상으로 한 실험 설정에서는 서로 다른 결과가 나타날 수 있다."

IFV 연구 결과는 아크 기법이 3D 펄스 기법보다 더 효과적으로 화재 가스를 냉각한다는 것을 보여준다. 그러나 두 번째 시나리오(정적 연기층)에서는 아크 기법이 펄스 기법보다 더 우수할 수도, 동일할 수도, 혹은 더 낮은 효과를 보일 수도 있다. 현재로서는 이에 대해 연구가 이루어지지 않았기 때문에 확정적인 결론을 내릴 수 없다.

벨기에에서는 연기 차단 커튼(smoke stopper)의 사용이 점점 증가하고 있다. 선착대가 활동하는 주택이나 아파트의 화재의 출입문은 대부분 닫혀 있으며, 창문 역시 거의 대부분 2 중 또는 3 중 유리로

되어 있어 닫힌 상태가 유지된다. 이러한 경우, 먼저 연기 차단 커튼을 설치한 후 출입문을 개방하게 된다. 이와 같은 상황에서는 동적 연기층(dynamic smoke layer)이 형성되지 않는다. 도시 환경(urban context)에서는 이러한 사례가 전체 화재의 대다수를 차지할 가능성이 높다.

따라서 네덜란드 연구는 동적 연기층(dynamic smoke layer)을 대상으로 수행되었음을 명심할 필요가 있다. 그러나 연기층이 비교적 정적인(static) 상황도 다수 존재한다. 이에 따라 정적 연기층을 대상으로 한 새로운 연구가 수행되는 것이 바람직하다

3.3 Steam

물은 열을 흡수한다. 열을 흡수하면 먼저 물의 온도가 100 °C 까지 상승한 후 수증기로 기화하며, 이후 이 수증기는 추가로 온도가 상승한다. 화재현장에서 수증기는 비활성 기체(inert gas)로 작용하며, 정적 연기층(static smoke layer)에서 중요한 역할을 수행할 수 있다. 가연성 혼합물의 연소 한계(flammability limits)는 비활성 기체가 첨가될 경우 크게 영향을 받으며, 이는 연기층의 가연성을 감소시키는 결과를 초래한다. 이러한 측면은 네덜란드 연구에서는 포함되지 않았다. 솔직히 말하면, 현 기술 수준에서는 이 요소를 연구하는 것이 불가능하다. 수증기가 실제로 어느 정도 기여하는지는 아직 정확히 알려져 있지 않다.

대량의 물을 주수하면, 사용 가능한 에너지의 상당 부분이 물을 가열하는 데 소비될 수 있다. 이는 물을 수증기로 전환하는 데 사용할 수 있는 에너지가 줄어든다는 것을 의미한다. 결과적으로, 최종적으로 생성되는 수증기량이 감소하며, 따라서 비활성화 효과(inertizing effect)도 상대적으로 작아진다. 직관적으로, 동일한 조건에서 펄싱 방식(water pulse)을 사용할 경우 아크 방식(arc method)보다 더 많은 수증기가 생성될 것으로 예상할 수 있다.

수증기는 특히 정적 연기층(static smoke layer)이 형성된 실내에서 중요한 역할을 한다. 반면 동적 연기층(dynamic smoke layer)에서는 냉각되고 비활성화된 연기가 지속적으로 외부로 유출되므로 수증기의 영향은 상대적으로 덜 중요하다. 이러한 점에서 네덜란드 연구진의 선택은 일관성을 가진다. 연구에서는 동적 연기층을 대상으로 하였기 때문에 수증기의 역할은 상대적으로 중요하지 않으며, 따라서 수증기의 효과는 연구에 포함되지 않았다. 그러나 이 또한 추가 연구를 통해 더 많은 지식을 확보할 수 있는 주제이다.

3.4 Water damage

아크 기법(arc method)과 관련하여 제기될 수 있는 중요한 우려 사항 중 하나는 수손 피해(water damage)이다. 필자가 미국 동료에게 해당 기법에 대한 의견을 물었을 때, 그는 다음과 같은 점을 지적하였다.

화재는 사회적·경제적 조건에 따라 차이를 보인다. 일반적으로 저소득층 주택에서 화재 발생 빈도가 높으며, 부유층 주택에서는 상대적으로 낮다. 이는 부유층의 주택이 대체로 소방설비가 잘 관리되고 최신 기준을 준수하는 반면, 저소득층 주택에서는 그러한 관리가 항상 이루어지지 않기 때문이다. 그 결과 화재 발생률은 저소득층에서 더 높게 나타나며, 부유층은 화재 보험(fire insurance)에 가입되어 있는 경우가 많다. 그러나 저소득층에서는 이러한 보호 장치가 항상 확보되어 있는 것은 아니다.

거실을 거쳐 침실로 이동하는 과정에서 아크 기법을 적용할 경우, 다량의 물을 사용하면 해당 공간 내 거의 모든 것이 손상될 수 있다. 이러한 수손 피해(water damage)는 화재 자체로 인한 피해보다 더 클 수도 있다. 화재 보험이 잘 갖추어진 가구에서는 큰 문제가 되지 않으며, 보험으로 모든 손실이 보상된다. 반면, 저소득층 가구에서는 진압 후 남은 물품을 분류하여 사용할 수 있는지 확인할 수밖에 없으며, 보험으로 손실이 보상되지 않는 경우가 많다. 특히 소규모 화재에서는 아크 기법 사용이 더 큰 문제를 야기할 수 있다. 펄싱 기법은 이와 비교하여 수손 피해가 훨씬 적다. 다만, 솔직히 말하면 펄싱 기법으로 인한 수손 피해량이 정확히 어느 정도인지는 아직 확실히 알려져 있지 않다

또한 아크 기법은 대체 불가능한 물품까지 손상시킬 수 있다. 예를 들면, 사진 앨범이나 물에 취약하며 큰 정서적 가치를 지닌 기타 소지품이 이에 해당한다. 이러한 경우에는 어떠한 보험도 손실을 보상할 수 없다.

아크 기법에서 사용되는 다량의 물은 3D 펄싱 기법보다 더 큰 피해를 초래할 수 있다. 다만, 이는 사용된 유량(flow rate)에 따라 달라진다. 본 연구에서는 최대 450 L/min 의 유량이 사용되었으며, 이는 시애틀(Seattle)에서 사용되는 유량의 약 절반 수준이다.

네덜란드 연구진의 실험에서는 실내 구조가 매우 단순하였다. 즉, 20m 직선 구간에 가구 등 장애물이 존재하지 않았다. 진압대원들은 화점의 위치를 사전에 알고 있었으며, 따라서 어디로 이동해야 하는지도 명확히 알고 있었다. 또한, 소방 호스는 4 명의 대원이 함께 전개시켰다. 그림 7.에서 화점까지의 이동에 75 초가 소요되었다고 가정하면, 이동하는 동안 약 560L 의 물이 사용된 셈이다.

그렇다면 이동 경로가 직선이 아닐 경우에는 어떻게 될까? 화점 위치를 탐색해야 하는 상황은 어떠한가? 화재 규모가 작아 화점(seat of the fire)을 즉시 확인할 수 없는 경우는 어떠한가? 가구 등 장애물이 존재하여 이동이 원활하지 않은 경우는 어떠한가? 혹은 다른 대원이 구조 활동을 수행하고 있어 화재 호스를 전개시키는 인원이 2 명뿐인 상황은 어떠한가?

이러한 모든 상황에서는 이동 시간이 더 길어지게 되며, 그 결과 사용되는 물의 양도 더욱 증가하게 된다.

화재가 격렬할수록 화재로 인한 피해가 커지고, 진압대원과 거주자에게 가해지는 위험도 증가한다. 격렬한 화재의 경우 아크 기법은 매우 효과적일 수 있다. 반면, 화재 규모가 작은 경우에는 수손 피해(water damage)이 얻을 수 있는 효과를 상회하지 않을 수 있다.

3.5 Safety Margin and effects on tactics

2015 년 브뤼셀에서는 펌프차 출동대 구성(staffing)에 변화가 도입되었다. 100 년 이상 펌프차 출동대는 5 명으로 구성되었으나, 이제 6 명으로 증가하였다. 그 이전까지는 각 화재 현장에서 한 명의 대원이 급수 호스(water supply hose) 설치 업무를 수행해야 했다. 이 업무를 이제 두 명(duo)에게 맡기는 것이 논리적일 수 있었으나, 실제로는 다른 방식이 도입되었다. 모든 화재 현장에서 표준적으로 급수 호스를 설치하지 않고, 현장 지휘관(company officer)이 필요 여부를 판단하도록 한 것이다. 이 결정은 진압대원, 현장 지휘관, 그리고 본부 책임자들 사이에서 강한 반발을 불러일으켰다. *표준 급수 중단은 진압팀(attack team)의 안전을 위태롭게 한다는 우려가 컸다!*

내부 공격(interior attack) 활동 중 진압팀이 물을 다 써버릴 위험도 존재하였다. 그 후 5 년이 경과하면서 점차 표준 급수 호스 설치가 줄어들었다. 그러나 대부분의 경우 펌프차의 물탱크에 비축된 2,500L 의 물로도 화재를 제어하고 심지어 진압할 수 있는 것으로 나타났다. 효율적으로 주수 기법(nozzle techniques)을 사용한 것이 이에 크게 기여한 것으로 보인다. 현재 우리는 약 20 년 전보다 2,500L 의 물로 더 큰 화재를 진압할 수 있게 되었다.

표준 급수 호스 설치를 중단함으로써 얻을 수 있는 가장 큰 장점은 다음 작업을 더 신속하게 시작할 수 있다는 점이다. 도시 환경(urban context)에서는 이는 종종 구조(rescue)의 속도 향상으로 이어진다. 만약 급수 호스 설치에 2 분이 소요된다고 가정할 경우, 호스를 설치하지 않을 경우 구조 활동이 2 분 더 빨리 시작될 수 있다. 최근 몇 년 동안 많은 소방서에서는 "five on one hose" 전술로 전환하였다. 이 전술에서도 급수 호스 설치는 별도로 수행되지 않는다.

2015 년 당시 많은 동료들이 우려했던 안전 여유(safety margin)는 펌프차의 물탱크에 저장된 물이다. 가스 냉각(gas cooling), 직접 공격(direct attack), 간접 공격(indirect attack)과 같은 주수 기법(nozzle techniques)을 활용하면, 대부분의 화재를 펌프차 내 물만으로 제어할 수 있으며, 여전히 일정량의 물이 남게 된다.

그림 7.의 실험에서는 화재 가스를 냉각하는 데 약 450L 의 물이 사용되었다. 그러나 가구가 배치된 환경에서 소방호스를 2 명이 전개시키고, 화재를 실제로 탐색(search)해야 한다면 얼마나 많은 물이 사용될 것인가? 그렇다면 화재 진압을 위해 남는 물은 얼마나 될까? 또한, 진압대원의 안전 여유(safety margin)는 얼마나 줄어들까? 이러한 점을 고려하면, 아크 기법의 사용이 나머지 진압활동 과정에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

현실적인 출동 상황(realistic deployments)에서의 물 사용량에 대한 연구가 실제로 필요하다. 이를 통해 평균적으로 얼마나 많은 물을 사용하는지 보다 정확히 이해할 수 있으며, 동시에 우리가 확보하고 있는 안전 여유(safety margins)에 대한 통찰도 얻을 수 있다. 이러한 연구를 통해, 많은 경우(이동 거리가 짧은 경우) 아크 기법을 펌프차의 물탱크 내 물의 용량에 기반하여 적용할 수 있다는 결론에 도달할 가능성도 있다.

3D 펄싱 기법은 훨씬 적은 물을 사용하며, 대부분의 화재에서 두 명의 대원이 내부 공격(interior attack)을 수행하고 나머지 두 명이 탐색 및 구조(search & rescue)를 수행하는 상황에서도, 펌프차에 대한 즉각적인 급수 설치 없이 활용할 수 있음이 입증되었다. 그러나 아크 기법의 경우에는 아직 이러한 운용이 검증되지 않았다.

또한, 플랑드르(Flanders) 지방과 네덜란드 양쪽에서 소방용 물을 상수도망(water supply network)을 통해 공급하는 방식을 점차 줄이는 경향에 대해 주목할 필요가 있다. 식수 공급과 소방용수 공급을 동시에 수행하는 것은 어렵기 때문이다. 소화전(hydrants) 사용에 대한 의문이 점점 더 많은 지역에서 제기되고 있다. 이러한 상황에서는, 다량의 물을 사용하는 기법을 적용하는 것이 적절하지 않을 수 있다.

3.6 Different geometry

본 연구에서는 폭이 2m 를 초과하는 공간에 대해서는 거의 다루고 있지 않다. 그러나 이러한 상황은 폭 2m 의 긴 복도보다 훨씬 더 흔하다. 화재가 발생한 다른 방에 도달하기 위해 거실이나 주방을 통과해야 하는 경우가 많다. 공간의 기하학적 구조(geometry)는 진압활동 결과에 상당한 영향을 미칠 수 있으며, 이와 관련해서는 여전히 많은 불확실성이 존재한다. 이는 아크 기법이 해당 상황에서 효과가 없다는 것을 의미하는 것이 아니라, 단지 아직 충분히 검증되지 않았음을 의미한다.

Image 8 The geometry of the setting was pretty simple: 20 meters straight out followed by a turn to the right. In reality, the situation can be a lot more complex. *(Picture: IFV)*

3.7 Too difficult

네덜란드 연구진은 펄싱 기법(pulse technique)의 수행이 어렵다고 언급한다. 그 근거로, 연구 과정에서 펄싱이 항상 올바른 방향으로 이루어지지 않았음을 제시하였다. 그러나 이 실험은 대부분 경험 있는 강사(instructors)에 의해 수행되었다. 여기서 말하는 것은 기술적 난이도(technical difficulty)이다.

연기층으로 펄싱을 통해 물방울을 전달하는 것은 신체적으로 어려운 작업은 아니다. 연구진의 지적대로, 일정한 숙련(skill)이 필요하며 따라서 충분한 연습(practice)이 요구된다.

반면, 450 L/min 에서 아크 기법을 수행하는 것은 신체적으로 상당한 부담을 요구한다. 미국 동료들은 일반적으로 3.5 bar 압력으로 작동하는 관창을 사용하며, 이는 우리가 사용하는 압력의 약 절반에 해당한다. 이로 인해 관창에 훨씬 더 큰 반작용력(reaction force)이 발생한다. 관창에서 450 L/min 의 물이 흐를 때 소방호스를 이동시키려면 상당한 신체적 힘이 필요하며, 체격이 작은(즉, 체중이 적은) 대원에게는 특히 큰 도전이 될 수 있다. 일반적으로 체중이 많을수록 큰 반작용력을 극복하는 것이 더 수월하다.

요약하면, 다음과 같이 정리할 수 있다. 펄싱 기법(pulse technique)은 기술적으로(technically) 어려운 반면, 450 L/min 에서의 아크 기법(arc method)은 신체적으로(physically) 어려운 것으로 평가된다.

3.8 Training

소방 조직 내에서는 교육(training) 문제로 어려움을 겪고 있다. 화재 진압 활동(firefighting)은 어렵고 복잡하며, 이를 적절하게 수행하기 위해서는 많은 기술(skill)이 요구된다. 그러나 내부 진압활동(indoor firefighting)은 전체 업무 중 많은 비중을 차지한다. 따라서 이를 안전하고 효과적으로 수행하기 위해 상당한 비율의 교육 시간이 필요하다. 지난 15 년간, 이 분야에서의 발전을 위해 많은 시간과 자원이 투자되었다. 교육 프로그램은 현재 우리가 수행하고 있는 직접 공격(direct attack), 간접 공격(indirect attack), 그리고 화재 가스 냉각(smoke gas cooling) 기술을 달성하기 위해 여러 차례 조정되었다. 만약 아크 기법(arc method)을 사용하여 가스 냉각 방식을 변경한다면, 대원(교육 대상자)들로부터 *"또 바뀐 거야?!"*라는 반응이 나올 위험이 있다.

아크 기법(arc method)을 도입할 경우, 기존의 고전적 가스 냉각(classic form of gas cooling)을 폐기할 수도 있다. 그러나 현재 이용 가능한 정보를 기반으로 보면, 이는 다소 성급한 결정으로 보인다. 화재 발생이 적고 내부 공격(interior firefighting) 경험이 거의 없는 지역에서는 아크 기법을 항상 사용하도록 선택할 수 있다. 이렇게 하면 간단하고 용이하며, 소위 'KISS 원칙(Keep It Simple, Stupid)[4]'에 부합한다. 그러나 단점으로는 물 사용량이 많아 수손 피해(water damage)가 증가한다는 점이다. 이러한 지역에서는 소방서 간 거리(station distance)가 다소 길어 추가 출동대(reinforcement), 즉 펌프차에 물을 공급할 소방력이 도착하는 데 시간이 더 걸릴 수 있다. 이는 결과적으로 진압팀(attack team)이 내부에서 물이 부족해질 위험을 증가시킨다.

[4] KISS(Keep It Simple, Stupid): 가능한한 단순하게 유지하라. 불필요한 복잡성을 재제하라는 원칙

아크 기법(arc method)을 기존 교육 과정에 '추가 방법(extra method)'으로 포함시키는 방법도 있다. 그러나 이는 추가 교육 시간이 필요함을 의미한다. 한편으로는 아크 기법 자체를 가르치기 위한 시간이고, 다른 한편으로는 언제 아크 기법을 사용할지, 언제 기존 가스 냉각(classic form of smoke gas cooling)을 사용할지를 판단하도록 가르치기 위한 시간이다. 아크 기법 자체를 배우는 것은 비교적 간단하지만, 언제 이를 적용하고 언제 기존 방식(3D 펄싱)을 사용할지를 결정하는 것은 별개의 문제이다. 따라서 이러한 결정 능력(training in decision-making)을 포함하려면 추가 교육 시간이 필요하다

따라서 이러한 선택은 교육 과정(formation)에 상당한 비용(cost)적 영향을 미친다**.**

4 What does this mean?

네덜란드 연구진이 수행한 연구는 '정교하고 탄탄한 작업(clever and solid work)이다. 이 연구를 통해 분명히 새로운 지식이 만들어졌다. 이제 중요한 질문은 다음과 같다.
이 새로운 지식을 우리는 어떻게 활용할 것인가?

벨기에에서는 내부 공격(interior attack)이 표준 전술로 간주된다. 반면 네덜란드에서는 이에 대해 다소 다른 관점을 취하고 있으며, 내부 공격을 기본적인 선택지로 적극 권장하지는 않는다.

450 L/min 에서의 아크 기법(arc method)은 기존의 가스 냉각(classic smoke gas cooling)이 적용되기 어려운 조건에서도 이동(progress)을 가능하게 한다. 이는 한편으로는 물의 높은 에너지 흡수량(energy absorption) 때문이며, 다른 한편으로는 이 기법이 3D 펄싱(3D pulse)보다 훨씬 더 먼 거리(15 m vs. 6 m)까지 냉각할 수 있기 때문이다. 그러나 반대로, 이 기법은 상당한 신체적 노력(physical effort)을 요구하며, 모든 진압대원이 이를 수행할 수 있는 것은 아니다.

아크 기법(arc technique)은 3D 펄싱 기법(3D pulse technique)보다 수행이 용이하다(기술적으로). 이는 부분적으로 아크 기법이 3D 펄싱에 비해 더 많은 "오차(errors)"를 허용하기 때문이다. 3D 펄싱은 효과적인 화재 가스 냉각(smoke gas cooling)을 위해 물방울이 정확한 위치에 도달해야 하는 반면, 아크 기법은 완전히 정확하게 수행되지 않더라도 여전히 충분한 냉각 효과를 보여 준다.

반면, 아크 기법(arc method)에 대해서는 여전히 알려지지 않은 부분이 많으며, 단점(disadvantages)도 존재한다.

Advantages	**Disadvantages**
Better cooling	More water damage
Easier to learn	Smaller safety margin
	Harder ➔ 5 on one hose

	Later search & rescue
	Often overkill

이를 기반으로 볼 때, 펄싱 기법(pulse method)을 아크 기법(arc method)으로 대체하는 것은 현명하지 않을 것으로 판단된다. 실제로 네덜란드 동료들도 그렇게 하지 않았다. 그들은 아크 기법을 '추가 방법(additional method)'으로 도입하였으며, 연기층(smoke layer)이 정지(stationary)하거나 천천히 움직이는 경우에는 롱 펄싱(long pulses)을 사용하고, 그 외 상황에서는 아크 기법을 적용한다.

대형 건물과 넓은 공간에서의 내부 공격(interior firefighting)은 주로 도시 지역에서 이루어진다. 이러한 지역에서는 일반적으로 경험 많은 진압대원을 더 많이 찾아볼 수 있다. 필자는 아크 기법(arc method)의 적용 영역을 주로 이러한 지역에서 찾을 수 있다고 본다. 이 기법은 더 큰 화점(seat of fire)으로 안전하게 접근할 수 있게 해주며, 또한 '직사 주수(full jet)'를 사용함으로써 물이 수평(horizontal)과 수직(vertical) 방향 모두에서 더 멀리 도달하도록 한다. 다만, 이러한 상황은 전체 사례 중 '일부(minority)'에 해당함을 유념할 필요가 있다.

간단히 정리하면, 이를 다음과 같이 볼 수 있다.

Pulse method	**Arc method**
Normal situation	Larger buildings, larger distances
Small and medium large fires	Large fires
Geen immediate water supply 즉각적인 급수(immediate water supply) 없음	Immediate water supply

따라서 아크 기법(arc method)은 '제한된 사례(limited number of cases)'에서 사용되는 추가적 도구(extra tool)로 기능하게 된다.

5 Final Thoughts

네덜란드 연구는 진정으로 '획기적(groundbreaking)'이다. 이 연구를 통해 새로운 지식(knowledge)과 새로운 통찰(insights)이 도출되었다.

네덜란드 소방 학교(Dutch Fire Academy)에서 화재 과학(fire science)을 강의하는 리카르도 위버(Ricardo Weewer)는 이번 연구 결과를 자랑스럽게 여길 만하다고 언급하였다. 이는 전적으로 옳은 평가로, 매우 철저한 연구가 수행되었음을 보여준다. 벨기에에서도 이러한 연구가 필요하다. 즉,

화재 진압(firefighting)에 관한 연구와 관련 학과(chair in "firefighting")[5]가 필요하다. 아직도 많은 질문들이 답을 기다리고 있기 때문이다. 사회의 지속적인 변화(예: 에너지 전환)에 따라 소방대원들은 끊임없이 새로운 문제에 직면하고 있으며, 이에 대한 지식이 절실히 요구된다. 네덜란드는 오랜 기간 동안 이러한 지식 축적에 크게 기여해 왔으며, 벨기에 또한 이에 대한 투자가 필요하다.

6 Sources

[1] *Brandweeracademie (2021) Wanneer water in rook opgaat, (When water goes up in smoke) An experimental research to the effect of the 3D puls method and arc method when cooling smoke gasses., IFV, The Netherlands*

[2] *Lambert K (2012) Gascooling, a new approach, De Brandweerman, November 2012*

[3] *Binnenbrandbestrijding, Koen Desmet & Karel Lambert, 2008 & 2009*

[4] *Lambert Karel, Baaij Siemco, Brandverloop: technisch bekeken, tactisch toegepast – 2nd edition, 2018*

[5] *Ricardo Weever, Rijk van den Dikkenberg, Thijs Geertsema, personal communication, 2022*

Karel Lambert

[5] 대학이나 연구기관에서 '소방학 분야'의 과목을 담당하는 과의 전임 교수 또는 연구/교육 책임자