

미분무수를 이용한 소화실험 (I) - 개인용 컴퓨터 화재 Water mist fire suppression (I) - A personal computer fire

김 명 배* · 장 용 재* · 한 용 식* · 윤 명 오**

Kim, Myung Bae* · Jang, Yong Jae* · Han, Yong Shik* · Yoon, Myoung O**

Abstract

Water mist fire suppression experiment is carried out for a personal computer fire. Fire spread is observed and analyzed by measured temperatures without the injection of the water mist. The extinguishment test shows that oxygen concentration increases rapidly upon the water mist injection. Also CO₂ concentration decreases steeply due to the injection because the water mist suppresses combustion reaction. Relative humidity goes up very steeply by the injection.

Key Words : Water mist, Suppression, Oxygen, Carbondioxide, Relative humidity

국문 요약

미분무수를 이용한 개인용 컴퓨터 화재진압 실험이 수행되었다. 분무가 없는 연소실험에서는 측정된 온도에 의해 화재확대 경로가 분석되었다. 소화실험에서는 미분무수의 작용에 의해 산소 농도가 급격히 증가하는 것이 관찰되었으며, 이산화탄소 농도는 급격히 감소되는 것이 측정되었다. 따라서 미분무수에 의한 연소반응 속도의 급격한 감소에 의해 산소농도가 증가하였음을 확인하였다. 미분무수의 증발에 의해 상대습도는 분사순간부터 급격히 상승하였다.

* 한국기계연구원 환경설비연구부

** 서울시립대학교 도시방재센터

1. 서론

소화제로써 물을 사용하는 소화설비는 소화전 및 소방대의 각종 노즐을 비롯하여 자동화재탐지장치와 연동되어 분무(Spray)의 형태로 물을 방출하는 스프링클러(Sprinkler), 물분무설비(Water spray system), 미분무수설비(Water mist system) 등이 있다. “물분무”란 “NFPA15”에 의하면 미리 정해진 모양, 입자크기, 속도 등을 가지고 특수 설계된 노즐(Nozzle)이나 장치로부터 방출되는 형태의 물을 의미한다.¹ 이러한 분무형태의 설비들은 각각의 분무특성이 다르기 때문에 방호할 수 있는 화재의 종류도 달라지게 된다.

스프링클러는 화재로부터 인명과 재산을 보호하기 위하여 현재 세계적으로 가장 광범위하게 사용되고 있다. 화재의 특성상 가연성액체 저장시설, 컴퓨터실, 물과 격렬히 화학반응하는 물질 등에는 사용하기 어렵지만 목재, 플라스틱으로 구성된 가연물이 있는 장소, 사무실, 가정, 창고 등의 방호에는 스프링클러가 가장 신뢰성 있는 소화설비로 인정되고 있다.

물분무 소화설비는 스프링클러와는 달리 특수화재 방호용으로 사용된다. 가연성액체나 변압기 등 스프링클러를 사용할 수 없는 대상물에 물분무 소화설비를 적용할 수 있는데, 그 이유는 물분무 소화설비의 분무특성이 스프링클러의 특성과 다르기 때문이다. 입자크기는 물분무설비가 스프링클러보다 작으며 따라서 스프링클러보다 물분무설비가 높은 방출압력을 필요로 한다. 미분무수 소화설비는 물분무설비 보다 비교적 더 높은 방출압력과 더 작은 물입자를 갖지만 방호 대상물의 공간조건도 제약을 받는다. 분무특성 및 노즐에 관한 기술적 특징을 감안하면 미분무수설비는 스프링클러보다 물분무설비와 유사하다.

NFPA (National Fire Protection Association)

가 구성한 NFPA 750 미분무수 소화설비 위원회(NFPA 750 Water Mist Fire Suppression System Committee)에서는 미분무수를 1,000 μm 미만의 Dv_{99} 로 된 물분무를 만드는 노즐 또는 설비로 정의하고 있다.² 이는 노즐에서 분사되는 물의 부피기준 99%가 직경 1.0mm 미만의 입자이어야 한다는 의미이며 Dv_{99} 가 5.0mm인 스프링클러 설비와 비교해 볼 수 있다. 그러나 물입자 크기와 화재진압 특성과의 일반적인 관계가 밝혀지지 않았기 때문에 위와 같은 정의는 제한된 의미로 인정되어야 한다.

NFPA를 비롯한 여러 기준들에서 예시되듯이 물분무 및 미분무수 설비는 소화제로써 물을 사용하지만 스프링클러를 사용하지 않는 방호대상, 예를 들면 가연성 기체 및 액체 등에도 적용할 수 있는 소화설비이다. 물을 사용한 소화원리는 화학적인 방법이 아닌 냉각 등에 의한 물리적 소화인데, 어떠한 차이점이 물분무 및 미분무수 설비를 인화성 액체물질 등에도 적용 가능하게 하는 지를 파악하는 것은 소화설비의 설계는 물론 설치 및 적용 시에도 매우 중요한 일이다. 이상에서 언급한 차이점의 근본 원인은 방출되는 물의 입자크기인데 다음 표 1을 참고하면 스프링클러, 물분무설비, 미분무수 설비의 입자크기를 대략 알 수 있다.³

표 1에서의 3m 낙하시간은 자유낙하 시의 시간이며 입자가 클수록 낙하시간이 작은 것은 입자의 중력과 항력(Drag force)이 입자의 직경에 따라 변화하기 때문이다. 화재를 향하여 물이 분사되었을 때 같은 방출압력이라면 물입자의 직경이 작을수록 대기 중에 또는 화염이나 열기류 내에 체재하는 시간이 길어진다. 뿐만 아니라 물입자가 증발하는 시간은 입자 직경의 제곱에 비례하기 때문에 입자의 직경이 작을수록 화염의 기저까지 도달하지 못하고 증발하여 수증기로 변화되기 쉽다.

표 1 입자의 크기에 따른 상태와 낙하속도

입자크기 (μm)	상 태	3m낙하시간 (초)
2000~5000	폭우	0.85~0.9
1000~2000	강우 (스프링클러)	0.9~1.1
500~1000	보통비 (스프링클러)	1.1~1.6
100~500	약한비 (물분무설비)	1.6~11
50~100	안개비 (물분무, 미분무수)	11~40
10~50	습한안개 (미분무수)	40~1,020
2.0~10	건조한안개	1,020~25,400
0.01~1.0	연기안개	부유
0.001~0.01	연기	부유

단순한 계산으로도 스프링클러(입자크기 1 mm기준)와 미분무설비(입자크기 0.01 mm기준)에서 방출된 물입자의 증발시간은 미분무 설비의 경우 스프링클러보다 10000배 짧아지게 된다. 한편 물입자의 모멘텀도 입자크기에 비례하기 때문에 입자가 큰 경우는 화재 플룸 또는 연기의 부력을 극복하여 화염의 기저에 도달하기 쉬워진다. 이와 같이 미분무 설비는 작은 입자에 의해 상대적으로 짧은 증발시간과 화염기저에 도달하기 어려운 특징을 가지고 있기 때문에 주로 냉각효과를 기대하는 스프링클러와 물분무설비에 비하여 소화원리를 질식과 냉각에 의한 효과로 규정짓게 하였다.

미분무수를 이용한 실험연구는 여러 분야에서 보고되고 있지만 화재규모, 공간크기, 분무량 및 입자크기 등의 상호관계가 일반적으로 알려져있지 않아 실물을 대상으로 한 직접적인 연구가 대부분이다.⁴⁻⁶ 본 연구는 미분무수를 이용 개인용 컴퓨터 및 부속물을 대상으로 화재 및 소화실험을 실시하고, 소화과정의 분석을 위하여 여러 곳의 온도와 연소가스농도, 상대습도 등을 측정하였다. 특히 상대습도는

분무된 입자의 기화된 정도를 계량화할 수 있는 물리적 변수로 판단되어, 타 연구에서는 시도되지 않았지만 본 연구에서 측정을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 가연물 및 실험장치

실험대상 가연물은 다음과 같이 구성된다.

- 개인용 컴퓨터 본체 1대
- 모니터(14") 1대
- Key board 1대
- Diskette(3.5" 10매) 및 보관 Box 1개
- 서적 10kg
- 각종 Cable 1set

실험은 우선 가연물들의 연소특성을 파악하기 위하여 분무시스템의 작동 없이 1차적인 연소실험을 실시하고 다음으로는 소화실험을 통하여 연소 및 소화특성을 비교하는 방법으로 수행하였다. 실험실 구조 및 각종 계측장비들의 배치를 그림1에 나타내었다. 실험용 Mock-up은 가로 2.5m, 세로 3.65m, 높이 2.15m의 크기로서 불연재 패널로 제작되었으며 전면에 출입문과 관측창을 설치하고 자연 통풍을 위하여 출입문 하부와 천장의 한쪽 부분에 개폐가 가능한 환풍기를 설치하였다.

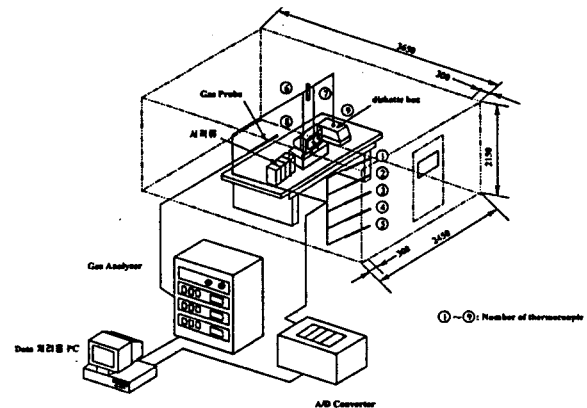


그림 1. A schematic diagram of experimental setup

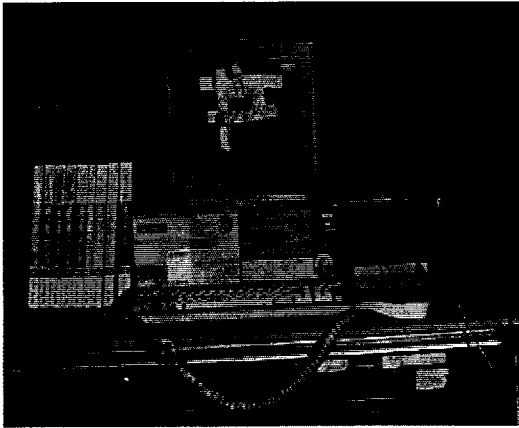


그림2. Burning materials before the burn test

실험대상 컴퓨터 관련 기기의 연소물은 Mock-up 중앙부에 위치한 실험대(소형책상) 위에 불연성 석고판을 올려놓고 그 위에 설치하였다. 컴퓨터 관련 기기는 그림2와 같이 일반적으로 사무실에서 사용하는 형태를 가정하여 수평형 본체 위에 모니터를 올려놓고, Diskette box와 서적 류는 본체의 양쪽 옆에 배치하였으며 각종 Cable류는 실제 사용할 수 있는 형태로 연결하였다.

2.2 점화 및 측정방법

모니터 내부에서 누전에 의한 착화를 가정하여 에탄올을 흡수시킨 가로 5cm, 세로 5cm의 천을 모니터 내부에 삽입하고 토오치로 점화를 시도하였으나, 모니터 내부에 연소물질이 없어 화염전파가 일어나지 않았다. 따라서 Key board와 본체 사이에 동일한 점화원을 이용 화재실험을 수행하였다.

화재실험 중 실험실내의 온도측정을 위하여 실험실 한쪽 모서리에서 수직으로 5개소(Ch1-5)와 연소물 중앙 상단부 1개소(Ch6)에 그림1과 같이 열전대를 배치하였으며, 컴퓨터 본체 상부와 모니터 정면 중앙부위 및 Diskette box 상부에 표면온도 측정용 열전대를 그림2와 같이 각각 1개씩 부착하여 실험중 위치에서의 온도분포를 측정하였다. Ch1 및

Ch6는 실험실 천장 10cm 아래에 설치하였으며, Ch2는 Ch1으로부터 10cm 아래, Ch3부터 Ch5까지는 각각 20cm 간격으로 설치하였다. 실험실에 Gas probe를 설치하여 실험중 발생하는 연소가스 중의 CO, CO₂ 및 O₂ 농도를 측정하였다. Probe는 실험실 길이방향으로 중앙, 천장하 30cm, 실험실 벽체로부터 10cm 돌출되도록 설치하였다. 상대습도 측정장치는 실험실의 바닥에 설치하였다. 본 연구에서 사용된 미분무수는 방출압력 60기압, 유량 9 l/min, 평균입경 30 μ m이며, 미분무수 헤드는 solid cone 형식의 압력노즐 4개로 구성되었다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 연소실험 결과

미분무수를 방출하지 않는 연소실험 중의 가연물들에 대한 연소상태를 정확히 관찰하기 위하여 Mock-up 전면부의 관측창 앞에 비디오 카메라를 설치하여 실험과정을 촬영하였으나, 점화후 약 12분부터는 연소가스로 인하여 촬영에 의한 관측이 불가능하였다. 따라서 각 가연물로의 연소확대 시기는 그림3의 온도곡선에 의하여 추정하였다.

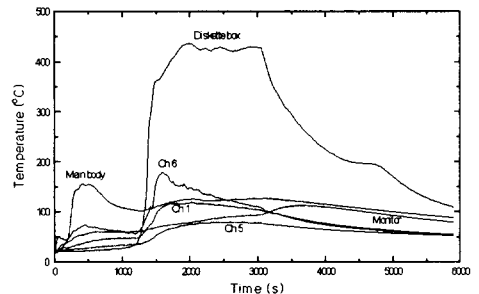


그림3. Temperatures during the burn test without water mist

점화원에 의하여 본체와 Key board는 즉시 착화하였으며, 이 열에 의하여 본체 상부

앞부분의 표면온도는 점화시점으로부터 약 4분 후 100℃ 부근까지 급격히 상승하였다. 이 부분의 온도는 실험종료시까지 더 이상의 상승은 없었다. 본체는 전면부를 제외하고 모두 철제 덮개판으로 구성되어 있어 전면부에서만 연소가 이루어졌으며, Keyboard는 점화위치로부터 횡방향으로 화염전파가 신속히 이루어졌다. 점화 후 약 20분에서 Diskette box로 화염이 전파되어 약 35분간 전소되는 동안 box 상부표면의 온도는 약 430℃까지 상승하여 약 55분까지 이 온도를 유지하다가 서서히 냉각되었다.

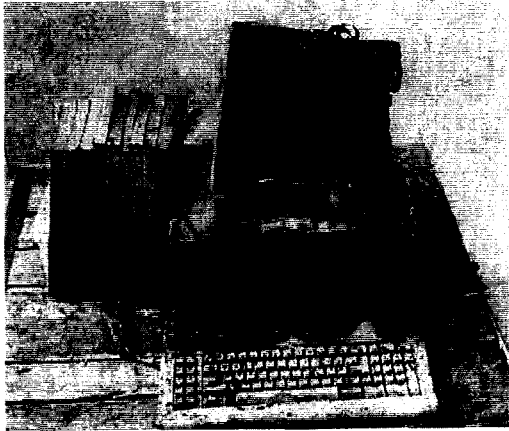


그림4. External appearance after the burn test

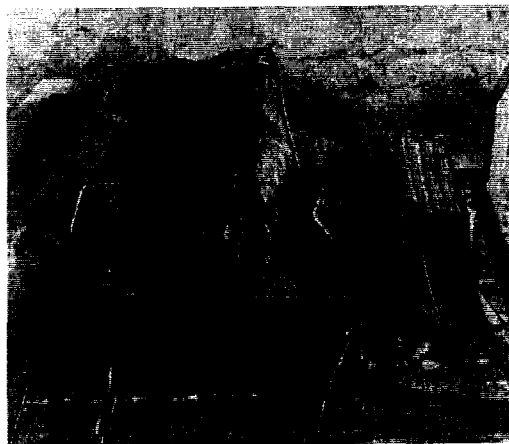


그림5. External appearance after the burn test (rear view)

모니터로의 화염전파는 점화후 약 25분에 이루어졌으며 모니터의 연소로 인하여 실험실 중앙 상층부의 온도(Ch6)는 175℃까지 상승하였고 실험실 구석의 상부와 하부(Ch1-5)에서는 100-70℃의 온도분포를 나타내었다. 모니터의 연소에 의해 브라운관은 파손되지 않았으며, Cable 및 서적들은 연소되지 않았다. 그림4 와 5는 연소실험 후의 가연물 상태를 보여준다.

연소중의 가스 농도 측정결과를 그림6에 표시하였다. 그림3과 비교하면 Diskette box의 최고온도 구간과 산소의 최저농도 구간 및 이산화탄소의 최고농도 구간이 일치하고, 산소농도의 급격한 감소시기와 Diskette box의 급격한 온도상승 시기가 일치하고있다. 따라서 Diskette box의 연소가 가장 지배적임을 알 수 있는데, 그림4 와 5의 실험 후 사진으로부터도 본체 및 모니터에 비해 Diskette box가 많이 연소된 것을 알 수 있다.

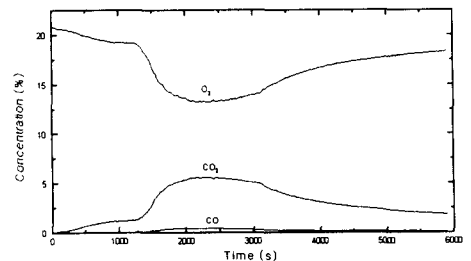


그림6. Concentration during the burn test without water mist

3.2 소화실험 결과

전 절의 연소실험에서는 Diskette box가 주 연소물이었으나, 다양한 화재 시나리오에 대한 분석을 위하여 소화실험에서는 컴퓨터 본체와 모니터가 주로 연소되도록 연소실험에서 사용된 화원을 이동시켰다. 분무전의 연소 확대 과정은 그림7로부터 파악될 수 있다. 점화시기는 자료취득 개시 후 500초 경과 시점이며 컴퓨터 본체의 착화에 이어 모니터로 연

소확대된다. 실험실 중앙 상층부(Ch6) 온도는 약 200℃까지 상승되어 연소실험 시의 온도보다 높다. 실험실 구석의 상하부(Ch1-5) 온도는 연소실험결과와 비슷하다. 실험중의 각종 가스 농도는 그림8에 제시되어 있으며, 그림7과 8로부터 본체와 모니터의 급격한 온도 상승 및 유지구간이 산소농도의 급격한 감소 및 이산화탄소 농도의 급격한 증가 구간과 일치하고 있다. 따라서 본 실험에서는 주 연소물이 본체와 모니터인 것을 알 수 있으며, Diskette box는 그 온도로 보아 연소되지 않은 것으로 판단된다.

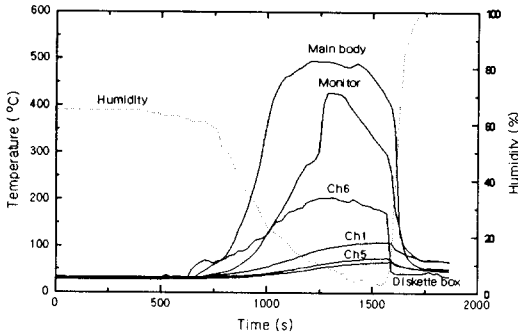


그림7. Temperatures during extinguishment

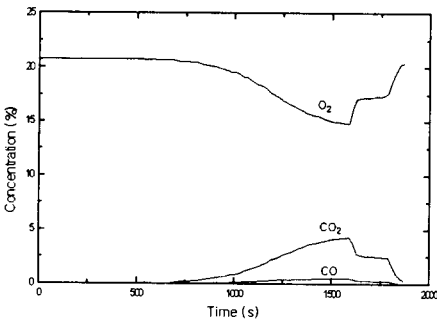


그림8. Concentration during extinguishment

소화실험에 있어서 분무시기의 결정은 여러 가지 실험자료를 얻는데 있어서 매우 중요하다. 실제의 화재에 대한 분무시스템은 설계된

온도에서 작동되지만, 이와 같이 실험할 경우 시스템의 최대 소화능력과 연소가스의 변화 등을 자세히 분석할 수 없기 때문에 본 실험에서는 연소가 가장 활발한 상태(Fully developed fire)에서 분무되도록 실험하였다. 분무시기는 그림7과 8에서 모든 온도곡선과 가스농도 곡선들이 급속히 하강 또는 상승하는 순간, 즉 점화후 약 18분이 지난 순간임을 알 수 있다. 소화시간은 1분 이내임을 그림7로부터 예상할 수 있다. 본체 및 모니터의 급격한 온도감소 순간과 Ch6의 급격한 온도감소 순간이 일치하고있으며, 이러한 급격한 온도감소 시점은 그림8의 산소농도의 급격한 상승시점-이산화탄소 농도의 급격한 감소시점과 일치-과도 일치하고 있다.

실험중의 상대습도는 그림7로부터 점화순간부터 완만히 감소하기 시작하며, 본체 등의 온도가 급격히 상승함에 따라 급격히 감소한다. 이것은 건구온도 상승에 따른 물의 포화 증기압력이 상승하기 때문이다. 분무순간부터 상대습도는 급격히 상승하여 거의 100%에 도달한다. 상대습도의 급격한 상승순간은 본체, 모니터 및 Ch6의 급격한 온도감소 순간과 일치하며, 따라서 그림8에서의 급격한 산소농도 증가순간과도 일치한다. 분무 후의 산소농도 증가는 연소반응속도의 급속한 감소에 그 원인이 있으며, 증발된 물입자에 의한 산소농도 감소효과보다 연소반응의 급격한 감소에 의한 산소농도 증가효과가 더 크기 때문으로 판단된다. 만일 완전히 밀폐된 공간에서 실험이 수행되었으면, 산소농도는 증가할 수 없기 때문에 분무에 의해서 산소농도 감소율이 줄어들고, 수분증발에 의한 효과도 반영되어 산소농도는 계속하여 감소할 것임을 추론할 수 있다. 보다 더 정확한 분석을 위하여는 공간의 밀폐도 측정과 여러 곳에서의 농도측정 등이 수행되어야한다.

4. 결론

미분무수 소화설비는 기존의 소화설비와 다르게 일반적인 엔지니어링 설계기준조차 알려져있지 않다. 방호공간의 크기와 밀폐도, 물입자의 크기와 유량, 물입자의 증발과 냉각 효과, 화재규모 등이 복잡하게 상호작용 하여 소화 메커니즘의 해석을 어렵게 하기 때문이다. 따라서 적절한 시험방법 없이 실규모의 화재진압 실험을 통하여 그 성능을 평가하고 인증절차가 수행되고 있다. 본 연구에서도 실규모의 개인용 컴퓨터 화재진압 실험을 통하여 국내에서 개발된 미분무수 소화설비의 소화능력을 제한된 범위에서 실험하고 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 디스켓 박스가 주된 연소물인 연소실험에서는 화재지속시간이 1시간 40분 정도이며, 디스켓 박스의 경우 430°C에서 20분 정도로 일정한 발열을 지속하였다.
- 2) 연소실험에서는 점화후 20분 정도 경과 시점에서 급격한 연소가 발생되었으며 산소, 이산화탄소의 농도측정 결과로부터도 확인되었다.
- 3) 소화실험에서는 미분무수의 방출과 함께 산소농도와 상대습도가 급격하게 증가하였다. 산소농도의 증가는 완전히 밀폐되지 않은 공간에서 분무에 의한 연소속도의 급격한 감소에 그 원인이 있으며, 분무로부터 형성된 수증기에 의한 산소농도 감소효과 보다 연소속도 감소에 의한 산소농도 증가효과가 크기 때문이다. 미분무수의 방출에 의한 상대습도의 급격한 증가는 소방용수에 의한 부차적 피해가 우려되는 컴퓨터 등 전자기기에 미분무수 시스템을 응용할 수 있는 단서를 제공할 수 있다. 즉 스프링클러에 비해 매우 적은 양의 물

을 사용하고 또한 미분무수의 입자가 스프링클러보다 매우 작기 때문에 미분무수 시스템에서는 소화용수의 순간적인 증발이 가능하기 때문이다.

참고 문헌

1. NFPA 15, Standard for water spray fixed systems for fire protection.
2. NFPA 750, Standard for the installation of water mist fire protection systems.
3. 이순목, "Water mist 소화설비의 연구개발", 소방검정 3.4 (1998), (일본 소방검정협회 다요리 1997년 7,8월호에서 번역).
4. R.G. Bill Jr, R.L. Hansen and K. Richards, "Fine-spray (water mist) protection of shipboard engine rooms", Fire Safety Journal, Vol.29, pp.317-336 (1997).
5. K.A. Notarianni, "Water mist fire suppression systems", Proc. of Technical Symp. on Halon Alternatives, SFPE, pp.57-64 (1994).
6. R.G. Bill, T.R. Marker and C.P. Sarkos, "Evaluation and optimization of an on-board water spray fire suppression system in aircraft", Proc. of Technical Symp. on Halon Alternatives, SFPE, pp.93-103 (1994).