

금속염 첨가제의 농도에 따른 미분무수 소화특성

박재만 · 신창섭

충북대학교 안전공학과

1. 서론

미분무수를 소화에 적용한 연구는 1950년대 중반에 UL(Underwriters' Laboratories, Inc.)에서 시작되었다. 당시 UL의 연구자들은 미분무수의 효용성과 잠재성을 인식하고 있었으나, 충분하지 못한 실험 데이터와 설계 규격으로 인해 소방설비로 개발하는데 한계에 직면하였고 사실상 미분무수에 관한 연구는 할론의 등장으로 중단되었다.

그러나 할론은 탁월한 소화성능에도 불구하고 1980년대에 지구의 오존층을 파괴하는 물질로 판명되어 1987년 몬트리올 의정서에 의거 사용을 금지하고 있는 물질이며 이에 따라 미분무수에 대한 관심이 다시 고조되고 있는 상황이다¹⁾.

미분무수의 주요 소화 메커니즘은 화염냉각(cooling), 수증기에 의한 산소치환(oxygen displacement), 복사열 차폐(blocking of radiant heat) 등의 물리적인 효과로 알려져 있다. 그러나 일련의 연구자들의 보고서에 의하면, 미분무수로 인해 연소현상의 억제 혹은 향상을 유발하는 화학반응이 존재할 가능성이 입증되었으며, 이러한 화학적 소화효과는 금속염 등의 첨가제에 의해서 향상될 수 있다^{2,3,4)}.

본 연구에서는 소화성능을 향상시킬 수 있는 금속염 첨가제로 아세트산 칼륨을 물에 일정 중량비로 첨가하여 헵탄 pool fire에 대하여 소화실험을 수행하였으며, 화염의 온도 및 산소 농도, 일산화탄소 농도를 측정하여 첨가제를 넣지 않았을 경우의 미분무수 소화특성과 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

소화실험은 스테인리스강 재질의 환기가 원활한 연소실 (0.75 m × 0.75 m × 1.3 m)에서 수행되었다. 연소실의 전면은 소화현상을 관찰할 수 있도록 강화유리로 제작하였으며, 좌우 하부에 개구부(0.5 m × 0.1 m)를 설치하여 0.58 m³/s의 유량으로 상온의 주변 공기가 유입될 수 있도록 하였다.

연료팬(0.15 m × 0.15 m × 0.05 m)은 연소실 바닥의 중앙에 위치하였고, 화염의 온도 측정을 위해 연료팬 상부 5 cm 높이에 K-type 열전대를 설치하였으며 A/D 컨버터를 통해서 Personal Computer로 1초마다 화염의 온도가 저장되었다. 연소실의 덕트 부위에 프로브를 삽입하여 연소가스 분석기(Quintox, KM-9106)로 배기가스 중의 O₂와 CO의 농도를 측정하였다. 점화 후 180 sec 후에 미분무수를 방출하였으며 각각의 소화실

험은 3 내지 4회의 반복실험을 통해서 평균적인 소화시간 및 화염온도, 가스농도를 얻을 수 있도록 하였다.

미분무수가 방수되지 않는 조건에서 자유연소를 통한 300 ml 헵탄 pool fire의 연소속도를 측정하였고 이를 통해 평균연소속도(mean burning rate, $\text{kg/m}^2\text{s}$)와 열방출률(heat release rate, kW)을 계산하였다⁵⁾.

실험에 사용된 미분무수 노즐은 바닥으로부터 1.1 m 높이에 설치하였다. 플린저 펌프를 사용하여 1.2, 2, 4 MPa의 가압수를 생성하였고 노즐 상부에 압력계를 설치하여 정확한 방수압력을 측정할 수 있도록 하였다.

또한 순수물에 첨가제를 용해시킬 경우 소화약제의 물리적 성질 변화를 측정하기 위해서 증류수 및 첨가제를 용해한 수용액의 밀도, 점도, 표면장력, 어는점, pH(수소이온 농도)를 측정하였다.

표면장력은 Du Noüy ring 법을 이용한 tensiometer (SEISAKUSHO, LTD. 514-B2)를 사용하여 측정하였고 밀도와 점도는 각각 비중병과 Ostwald 점도계를 이용하여 측정하였다. 수용액의 어는점은 bath circulator에 10 ml 용액을 넣은 시험관을 담그고 냉각하여 일정온도에서 유리막대로 휘저어 결정이 석출되었을 때의 온도를 읽되 3회 반복 측정하여 평균값을 어는점으로 하였다.

첨가제에 의한 소화효율을 분석하기 위해서 아세트산 칼륨을 중량비율 10%, 30%, 50%로 수돗물에 용해하여 첨가제를 넣지 않았을 경우의 소화특성과 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 1에는 실험에 사용된 아세트산 칼륨 수용액의 물성값을 측정하여 나타내었다.

수용액의 밀도는 10 wt.% 칼륨염의 경우 1049.56 kg/m^3 으로 5.1% 순수물에 비하여 증가하였고 30, 50 wt.%의 경우 각각 16, 28% 증가하였다. 밀도의 증가는 분무시 액적의 운동량을 그만큼 증가시킬 수 있는 효과가 있고 이에 따라 화염면으로의 액적의 침투를 증가시킬 수 있어 소화효율을 높일 수 있다.

수용액의 점도는 7.8, 60, 242% 증가한 것으로 나타났는데, 고체 가연물의 경우 물의 점도를 증가시킴으로써 소화수의 유실을 막아 건물, 수목 등의 입체면에 부착되어 잔류하면 소화효과가 높아진다. 액체 연료를 사용한 화재 실험에 있어서 점도와 소화효율의 관계에 대해서는 아직까지 실험 데이터가 부족한 실정이다. 다만 점도가 증가할수록 레이놀즈 수가 감소하게 되고 레이놀즈 수가 3000 보다 작을 경우 splashing 현상이 일어나지 않는다는 연구결과가 보고된 바 있다⁶⁾.

표면장력은 50 wt.%의 경우 순수물에 비하여 감소한 것으로 나타났다. 액체표면에 액적이 충돌할 때 나타나는 현상은 floating, bouncing, coalescing, splashing의 형태이다. Splashing 현상은 액체표면에 액적이 충돌 후 2차적으로 액적들이 형성되는 현상을 의미하는데, 이로 인해 액체표면의 전체적인 표면적이 증가하게 된다. 이렇게 증가된

액체 연료의 표면적으로 인해서 때때로 flare-up 현상이 동반된다. Manzello와 Yang은 표면장력이 물보다 작은 경우 splashing 현상이 보다 적게 발생한다고 하였다⁷⁾.

수용액의 어는점은 칼륨염 첨가에 따라 10, 30 wt.%의 경우 각각 -7.5, -24.4 °C로 떨어졌다. 50 wt.%의 경우는 -40 °C까지도 수용액이 얼지 않았고 실험장비의 특성상 그 이하로는 측정할 수가 없었다.

또한 수용액의 pH는 첨가제의 영향으로 염기성을 나타내었다. 소화약제가 염기성을 띠게 되면 환경적으로 유해할 뿐만 아니라 장비의 부식을 유발하는 결과를 초래한다.

Table 1. Physical properties of the solution

Fluid	Density @20°C (kg/m ³)	Dynamic viscosity @20°C (Ns/m ²)	Surface tension @20°C (N/m)	Freezing point (°C)	pH @20°C
Distilled water	998.23	0.00089	0.072	0	5.3
10 wt.% K-acetate	1049.56	0.00096	0.073	-7.5	9.8
30 wt.% K-acetate	1157.00	0.00142	0.073	-24.4	10.3
50 wt.% K-acetate	1277.68	0.00305	0.070	-40 ^{a)}	11.1

a) not able to measure below this temperature

미분무수가 방수되지 않는 조건에서 자유연소를 통한 헵탄 pool fire의 연소속도를 측정한 결과, 평균연소속도는 0.025 kg/m²s, 열방출률은 25.09 kW이었다. 300 ml의 헵탄을 자유연소 시킬 경우 평균적으로 380 sec(6'20")동안 연소가 이루어졌다.

Fig. 1은 첨가제를 넣지 않은 경우의 실험 결과로 고압(4 MPa)에서만 화염이 소화되었고, 저압(1.2 MPa)에서는 자유연소시 보다 더 오랫동안 연소가 지속되었으며, 중압(2 MPa)에서는 자유연소시와 비슷한 연소 시간을 나타내었다.

노즐로부터 방수되는 물 액적의 운동량이 화염의 플럼을 뚫을 만큼 충분치 못한 경우, 액적은 화염 주변으로 빙겨나가 화염을 감싸게 되고 이로 인해 열방출률과 연료의 연소속도는 줄어들게 된다. 따라서 Fig. 1, 2에서 알 수 있듯이 저압의 경우 헵탄의 총 연소시간은 늘어나게 되었고⁸⁾, 이러한 현상은 10 wt.%의 첨가제를 넣었을 경우 저압에서 좀더 뚜렷이 나타나는데 칼륨염에 의한 부족매 효과 및 단일 액적의 평균증발속도 감소로 인해서 연소가 더욱 지연되었기 때문이다.

물 액적이 화염의 플럼을 뚫고 화염의 심부까지 도달한 경우, 연소반응은 순간적으로 격렬하게 진행되어 화염이 확대되는 flare-up 현상이 발생한다. 이 경우 화염의 순간적인 소화가 이루어지기도 하지만 그렇지 않으면 화염은 격렬하게 지속된다. Fig. 1에서 중압의 경우 소화는 되지 않으면서 연소시간이 저압, 자유연소시 보다 더 짧아진 것은 이상과 같은 이유에서이다.

Fig. 2, 3, 4는 아세트산 칼륨염을 각각 10, 30, 50 wt.%의 중량비로 넣었을 때의 실험

험 결과로 첨가제를 함유한 단일 액적은 중량 증가에 따른 운동량 증가로 더욱 화염의 심부, 즉 화학 반응과 공기 유입에 의해서 화염이 지속되는 영역(persistent zone)-연료 표면까지 도달할 수 있다⁹⁾. 이곳에서 액적이 증발과정을 거치며 결정을 이루게 되고 연소의 연쇄반응을 이끄는 H 원자와 OH 라디칼의 포착체로 작용함으로써 연쇄반응의 연결고리가 끊어져 소화가 이루어진다고 판단할 수 있다.

Fig. 1, 2, 3, 4를 통해 본 실험 조건에서 방수압력이 증가할수록 화염은 더 빠르게 소화되는 것을 확인할 수 있었고, 따라서 미분무수의 소화 메커니즘에서 냉각효과가 지배적인 요인임을 알 수 있었다. 또한 칼륨염의 함유량이 높아질수록 화염은 더 빠르게 소화되었는데 10 wt.%의 경우는 중압 이상에서부터 소화가 이루어졌고 함유량이 30, 50 wt.%인 경우는 저압, 중압, 고압의 압력조건에서 모두 소화가 되었다.

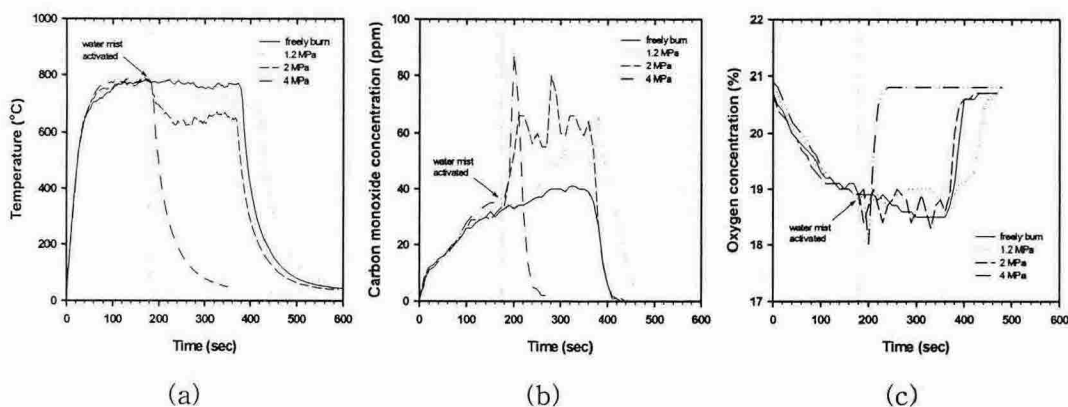


Fig. 1. Results of test 1 with water mist.

(a : temperature variation, b : CO concentration, c : Oxygen concentration)

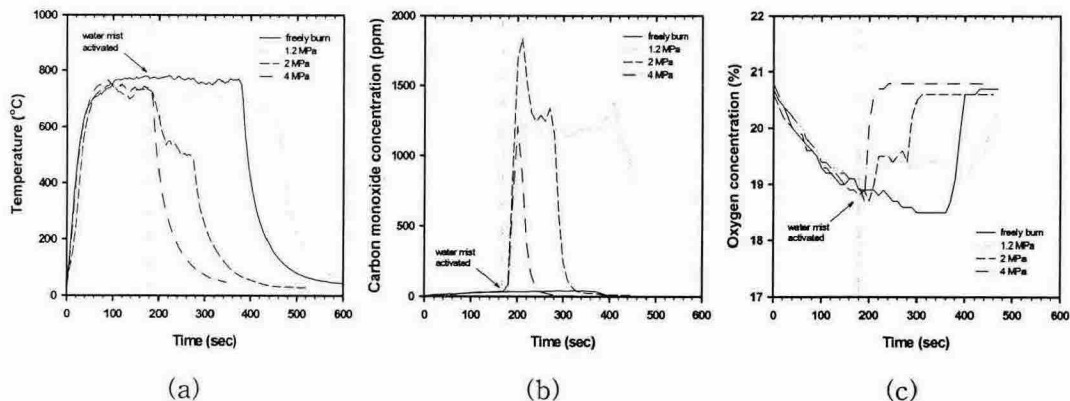


Fig. 2. Results of test 2 with water mist containing 10 wt.% K-acetate.

(a : temperature variation, b : CO concentration, c : Oxygen concentration)

화염의 열을 흡수한 미분무수는 수증기로 전환시 부피가 약 1,600배 팽창하는데, 이렇게 팽창된 수증기는 반응영역(persistent zone)으로 유입되는 산소의 농도를 떨어뜨리

게 된다. Fig. 1(b), 2(b), 3(b), 4(b)에서 미분무수를 방수한 후 일산화탄소의 농도가 증가한 이유는 위와 같은 상황에서 연소가 보다 더욱 불완전하게 이루어졌기 때문이며 또한 칼륨염의 부촉매 효과에 의한 화학적인 작용이 그 원인으로 판단된다. Fig. 1(b)에서 일산화탄소의 농도는 방수압이 고압에서 최고값을 나타낸 반면, Fig. 2(b)에서는 중압에서 최고값을 나타내었다. 또한 Fig. 3(b), 4(b)에서는 방수압과 첨가량을 증가시킬수록 일산화탄소의 농도는 더 빠르게 감소하였고 최고 농도값 또한 낮게 나타났다. 이는 방수압과 첨가량이 증가할수록 반응영역으로 유입되는 미분무수의 양이 증대되고, 이로 인해 연료표면을 냉각시켜 증발되는 연료의 양이 줄어들어 일산화탄소의 농도가 줄어드는 것으로 판단된다.

Fig. 1(c), 2(c), 3(c), 4(c)에는 미분무수를 방수하기 전·후의 산소 농도변화를 나타내었는데, 실험에 사용된 미분무수는 물 입자의 평균 직경이 대단히 작기 때문에($D_{V0.9} \leq 200 \mu m$) 화염으로부터 발생하는 열을 빠르게 흡수, 연소강도가 약하게 되고 상대적으로 연소반응으로 소모되는 산소의 양이 적어지기 때문에 미분무수 방출 후 산소의 농도는 증가하게 되었다.

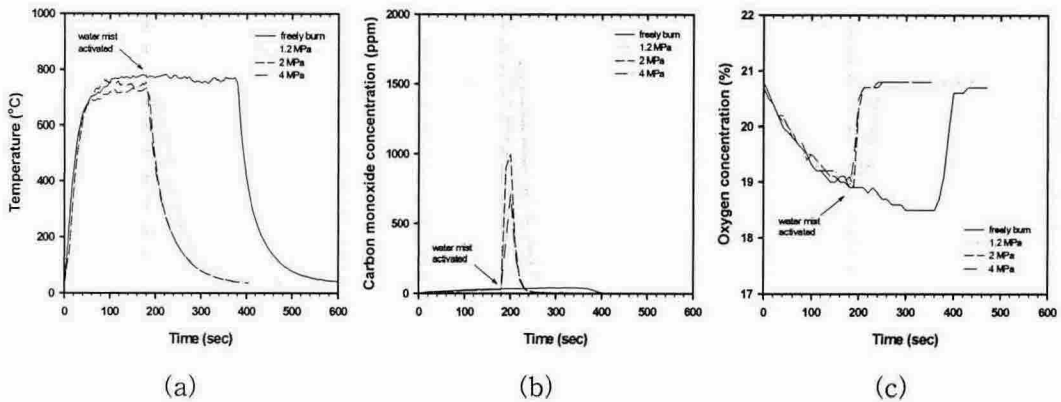


Fig. 3. Results of test 3 with water mist containing 30 wt.% K-acetate. (a : temperature variation, b : CO concentration, c : Oxygen concentration)

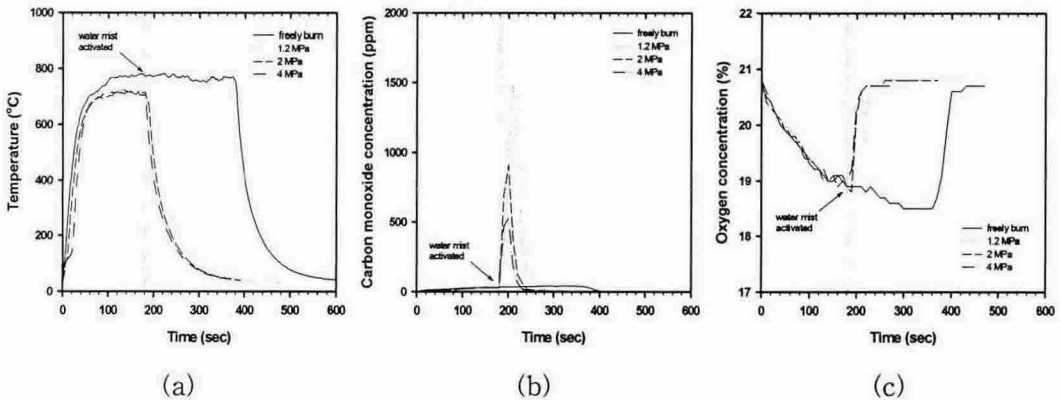


Fig. 4. Results of test 4 with water mist containing 50 wt.% K-acetate. (a : temperature variation, b : CO concentration, c : Oxygen concentration)

4. 결 론

본 연구에서는 소화성능을 향상시킬 수 있는 첨가제로 아세트산 칼륨을 물에 중량비로 10, 30, 50 % 첨가하여 헵탄 pool fire에 대한 소화실험을 수행하고 화염의 온도 및 산소 농도, 일산화탄소 농도를 측정하여 첨가제의 농도에 따른 미분무수 소화특성을 분석하고자 하였다.

첨가제를 넣지 않은 미분무수의 경우 방수압력을 증가시킬수록 화염은 더 빠르게 소화가 되었고, 냉각효과가 지배적인 소화 메커니즘임을 확인할 수 있었다. 그러나 첨가제의 함유량을 높일수록 화염은 저압에서도 소화되었고, 첨가제로 인한 부촉매 효과가 대폭적으로 증대되어 소화가 이루어진 것으로 판단된다. 첨가제의 효과는 소화시간을 단축시키는 점과 저압에서도 소화가 가능하다는 점에서 장점을 갖고 있으나, 일산화탄소의 농도가 순간적으로 급격하게 증가하는 단점을 나타내었다.

참고문헌

- 1) United Nation Environmental Program (UNEP), "Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer", 1987.
- 2) B.A. Williams, J.W. Fleming, "Suppression mechanisms of alkali metal compounds", Halon Options Technical Working Conference, pp. 157~169, 1999.
- 3) M.D. King, J.C. Yang, W.S. Chien, W.L. Grosshandler, "Evaporation of a small water droplet containing an additive", *Proc. of the ASME National Heat Transfer Conference*, Baltimore, 1997.
- 4) H.K. Chelliah, A.K. Lazzarini, P.C. Wanigarathne, G.T. Linteris, "Inhibition of premixed and non-premixed flames with fine droplets of water and solutions", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, pp. 369~376, 2002.
- 5) M.B. Kim, Y.J. Jang, M.O. Yoon, "Extinction limit of a pool fire with a water mist", *Fire Safety Journal*, Vol. 28, pp. 295~306, 1997.
- 6) F. Rodrigues, R.J. Mesler, "Some drops don't splash", *J Colloid Interface Sci*, Vol. 106, pp. 347~352, 1985.
- 7) S.L. Manzello, J.C. Yang, "An experimental study of a water droplet impinging on a liquid surface", *Experiments in Fluids*, Vol. 32, pp. 580~589, 2002.
- 8) B. Yao, W. Fan, G. Liao, "Interaction of water mists with a diffusion flame in a confined space", *Fire Safety Journal*, Vol. 33, pp. 129~139, 1999.
- 9) J. Richard, J.P. Garo, J.M. Souil, J.P. Vantelon, V.G. Knorre, "Chemical and physical effects of water vapor addition on diffusion flames", *Fire Safety Journal*, Vol. 38, pp. 569~587, 2003.