

첨가제-미분무수에 의한 액체 연료 화재의 소화

박재만 · 신창섭

충북대학교 안전공학과

1. 서 론

할론은 탁월한 소화성능에도 불구하고 지구의 오존층을 파괴하는 환경문제 때문에 1987년 몬트리올 의정서에 의거 사용을 금지하고 있는 물질이며 이에 따라 대체 소화약제의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다.

미분무수 소화설비는 할론계 물질을 사용하는 가스계 소화설비의 대체로써 각광받고 있으며, 이러한 미분무수 시스템의 주요 소화 메커니즘은 화염냉각, 수증기에 의한 산소치환, 복사열 차폐 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^{1,2)}.

본 연구에서는 소화성능을 향상시킬 수 있는 첨가제로 칼륨염과 나트륨염을 물에 소량 첨가하여 헵탄 pool fire에 대하여 소화실험을 수행하여, 화염의 온도 및 O₂(Oxygen) 농도, CO(Carbon Monoxide) 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 주변공기가 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 소화실험은 3 내지 4회의 반복실험을 통해서 평균적인 소화시간 및 화염온도, 가스농도를 얻을 수 있도록 하였다.

미분무수가 방사되지 않는 조건에서 자유연소를 통한 300 ml 헵탄 pool fire의 연소속

도를 측정하였고 이를 통해 평균연소속도(mean burning rate, $\text{kg/m}^2\text{s}$)와 열방출률(heat release rate, kW)을 계산하였다³⁾.

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

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

첨가제에 의한 소화효율을 분석하기 위해서 아세트산 칼륨, 아세트산 나트륨을 중량 비율로 10% 수돗물에 용해하여 첨가제를 넣지 않았을 경우의 소화특성과 비교하였다.

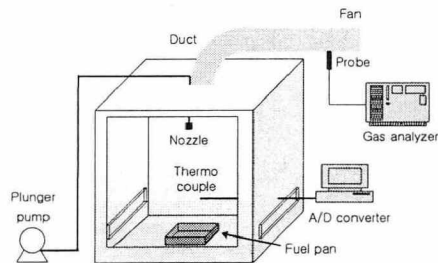


Fig. 1. Schematic of experimental set-up.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 첨가제에 의한 소화약제의 물성변화

Table 1에는 실험에 사용된 순수물과 수용액의 물리적 특성치 값을 측정하여 나타내었다.

수용액의 밀도는 10wt.% 나트륨염의 경우 1029.23 kg/m^3 , 칼륨염의 경우 1049.56 kg/m^3 으로 각각 3.1% 내지 5.1% 순수물에 비하여 증가하였다. 밀도의 증가는 소화분무시 액적의 운동량을 그만큼 증가시킬 수 있는 효과가 있고 이에 따라 화염면으로의 액적의 침투를 증가시킬 수 있어 소화효율을 높일 수 있다.

수용액의 점도는 나트륨염의 경우 순수물에 비하여 12.3%, 칼륨염의 경우 7.8% 증가한 것으로 나타났는데, 일반적으로 순수물은 유동성 때문에 소화대상물에 오래 부착되어 있지 못하다. 따라서 물의 점도를 증가시킴으로써 유실을 막아 건물, 수목 등의 입체면에 부착되어 잔류하면 소화효과가 높아진다.

표면장력은 나트륨염, 칼륨염의 경우 순수물에 비하여 5.6%, 1.4% 증가한 것으로 나타났다. 소화시 표면장력의 증가는 소화작용에 복합적인 영향을 줄 수 있는데, 일반

적으로 계면활성제를 1%이하로 첨가하여 표면장력을 저하시킴으로써 물의 침투, 흡수 작용을 강화한다.

수용액의 어는점은 나트륨염, 칼륨염을 10wt.% 첨가함에 따라 각각 -8°C , -7.5°C 로 떨어졌고, 또한 pH는 첨가제의 영향으로 약한 염기성을 나타내었다. 소화약제가 염기성을 띠게 되면 환경적으로 유해할 뿐만 아니라 장비의 부식을 유발하는 결과를 초래한다.

이와 같이, 소화효율을 향상시키기 위한 방법으로서 첨가제의 사용은, 우선적으로 물성치의 변화를 측정하여 그 장단점을 파악해야 한다.

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% K-acetate	1049.56	0.00096	0.073	-7.5	9.8
10% Na-acetate	1029.23	0.00100	0.076	-8	8.8

3.2 소화 특성

미분무수가 방수되지 않는 조건에서 자유연소를 통한 헵탄 pool fire의 연소속도를 측정 한 결과, 평균연소속도는 $0.025\text{ kg/m}^2\text{s}$, 열방출률은 25.09 kW 이었다. 300 ml의 헵탄을 자유연소 시킬 경우 평균적으로 380 sec(6'20")동안 연소가 이루어졌다.

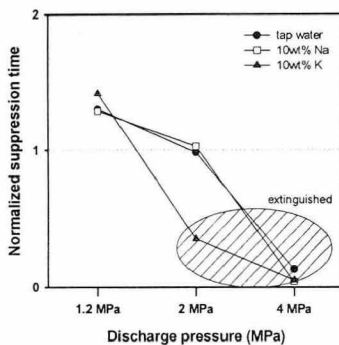


Fig. 2. Normalized extinguishing times as a function of discharge pressure.

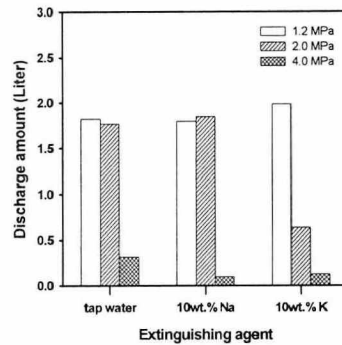


Fig. 3. Discharge amount of an extinguishing agent with pressure.

Fig. 2는 소화약제별 소화시간을 표준화한 것으로 첨가제를 넣지 않은 일반 수돗물의 경우는 고압(4MPa)에서만 화염이 소화되었고, 저압(1.2MPa)에서는 자유연소시 보다 더 오랫동안 연소가 지속되었으며, 중압(2MPa)에서는 칼륨염을 첨가했을 경우를 제외하고 자유연소시와 비슷한 화염소멸 시간을 나타내었다.

Fig. 3은 실험에 사용된 소화약제의 각 방수압력에서의 총 방수량을 나타낸 것으로

화염이 소화 혹은 소멸되기까지의 전체 방수된 소화약제의 양을 나타낸다.

물론 공기의 흐름이 원활하지 않은 밀폐된 장소에서는 실험결과가 다르게 나올 것이라 예상할 수 있지만, 위의 두 실험 결과로부터 미분무수 소화시스템에서 일정크기의 화염을 소화하기 위한 소화약제의 방수압과 방수량은 선형적인 관계를 갖지 않으며, 어느 임계점이 존재한다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 방수압력이 커질수록 노즐로부터 생성되는 액적의 입자 크기는 작아지기 때문에 보다 원활한 화염의 냉각이 이루어질 수 있다^{4,5)}. 그러나 본 실험을 통해 관찰한 결과, 중압에서 고압으로의 압력증가에 따라 입자의 크기는 평균적으로 5.2% 감소하였기 때문에 화염 소화의 지배적인 원인을 냉각효과만으로 볼 수 없으며, 이와 함께 blowing 효과(연료표면의 유증기를 날려버리는 것)에 의해서 화염이 소화된 것으로 간주할 수 있다⁶⁾.

Fig. 4에서 저압의 경우 연소시간이 자유연소시 보다 더 길어진 이유는 액적의 운동량이 화염의 플럼을 뚫을 만큼 크지 않기 때문에, 단지 화염의 크기가 작아지고 열방출률이 작아져서 연소속도가 느려졌기 때문이다.

이러한 현상은 첨가제를 넣었을 경우 더욱 뚜렷이 나타나는데 칼륨 혹은 나트륨에 의한 부촉매 효과로 인해서 연소가 더욱 지연되었기 때문이다¹⁾. 흥미로운 사실은 중압의 경우 칼륨염 첨가제를 넣었을 때, 화염이 소화되었다는 것이다.

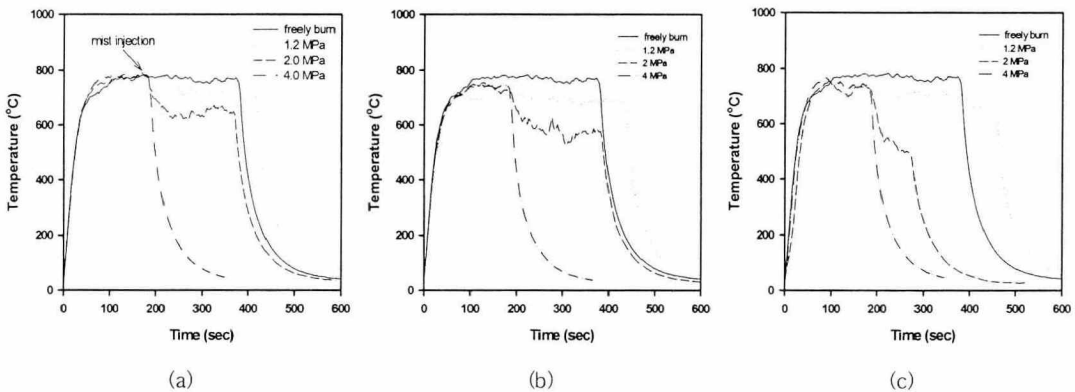


Fig. 4. Flame temperature variation of *n*-heptane pool fire.
(a : tap water, b : 10 wt.% Na-acetate, c : 10 wt.% K-acetate)

동일 압력에서 입자의 속도가 일정하다고 가정할 경우, 첨가제를 함유한 단일 액적은 중량 증가에 따른 운동량 증가로 보다 화염의 심부, 즉 화학 반응과 공기 유입에 의해서 화염이 지속되는 영역(persistent zone)-연료표면까지 도달할 수 있다⁷⁾. 이곳에서 연소의 연쇄반응을 이끄는 H와 OH 라디칼이 첨가제와 반응함으로써 연료의 불완전연소가 더욱 활발히 진행되고 결론적으로 화학적 효과가 증진되어 소화가 이루어진다고 판단할 수 있다.

또한 알칼리 금속의 소화성능은 원자량 증가에 따라서 향상된다고 알려져 있다. 즉

소화성능은 $Li < Na < K < Rb$ 의 순으로 증가한다⁸⁾.

본 실험에서 측정된 O_2 의 농도는 화염부근이 아닌 덕트에서 측정된 것이기 때문에 Fig. 5의 결과로 질식효과의 유무를 판단하기는 어렵다. 단지 첨가제를 넣었을 경우 O_2 농도가 약간 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 유입되는 공기량이 충분한 조건에서 화염의 크기가 작아짐으로써 상대적으로 연소반응으로 소모되는 O_2 의 양이 적어지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 CO의 농도변화를 나타내었는데, 첨가제를 넣은 경우 불완전연소로 인해서 CO의 발생량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다.

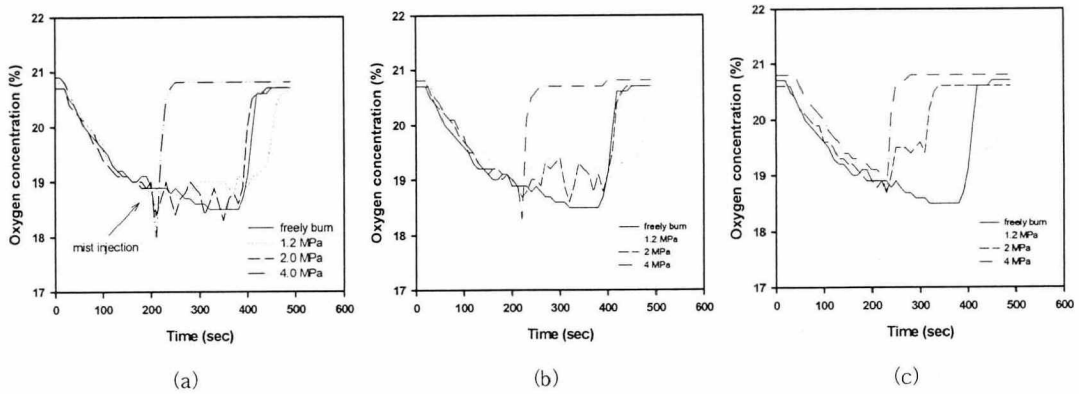


Fig. 5. Oxygen concentration of *n*-heptane pool fire.

(a : tap water, b : 10 wt.% Na-acetate, c : 10 wt.% K-acetate)

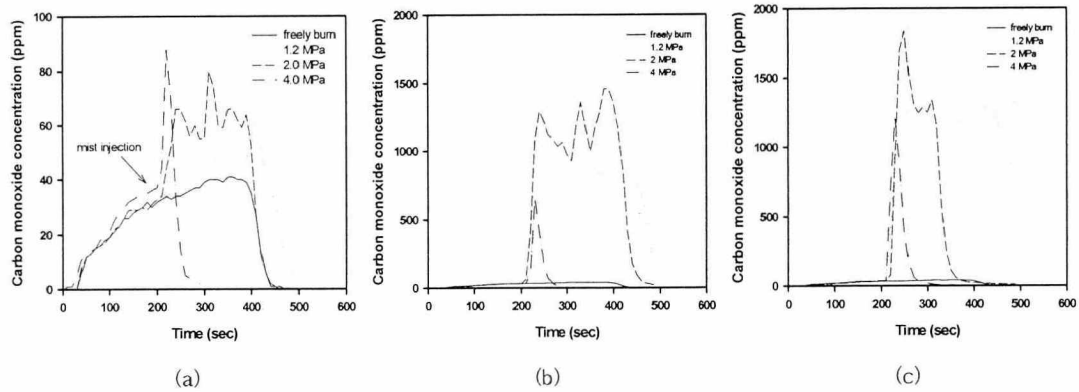


Fig. 6. Carbon Monoxide concentration of *n*-heptane pool fire.

(a : tap water, b : 10 wt.% Na-acetate, c : 10 wt.% K-acetate)

4. 결론

본 연구에서는 소화성능을 향상시킬 수 있는 첨가제로 아세트산 칼륨 및 아세트산

나트륨을 물에 중량비로 10% 첨가하여 헵탄 pool fire에 대한 소화실험을 수행하여, 화염의 온도 및 O₂ 농도, CO 농도를 측정하여 첨가제를 넣지 않았을 경우의 미분무수 소화특성과 비교하였다.

저압(1.2 MPa)에서는 물 액적이 화염의 플럼을 뚫지 못하기 때문에 소화는 이루어지지 않았고, 단순히 화염의 크기를 작아지게 하였다. 중압(2 MPa)에서는 첨가제를 넣었을 경우 액적의 운동량 증가에 따른 물리적 소화효과와 첨가제의 화학적 소화효과가 상승작용을 하여 화염을 소화시켰다. 고압(4 MPa)에서는 미분무수 시스템의 주요 소화 메커니즘 이외에도 blowing 효과에 의해서 화염이 소화되는 것을 관찰할 수 있었다. 첨가제의 성능은 나트륨염 보다는 칼륨염이 소화 성능 면에서는 우수하였다.

본 실험조건에서는 산소치환에 의한 질식효과를 증명할 수 없었다. 또한 첨가제에 의한 불완전연소로 연소실내의 CO 농도가 급격히 증가하기 때문에 밀폐된 공간에서 사용되는 미분무수 소화시스템을 설계할 경우 역효과를 고려하여야 한다.

참고문헌

- 1) B.A. Williams, J.W. Fleming, "Suppression mechanisms of alkali metal compounds", Halon Options Technical Working Conference, pp. 157~169. 1999.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) B. Downie, C. Polymeropoulos, G. Gogos, "Interaction of a water mist with a buoyant methane diffusion flame", *Fire Safety Journal*, Vol. 24, pp. 359~381, 1995.
- 5) 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.
- 6) A.K. Kim, "Improvement of water mist performance with foam additives", *Proceedings of Fire Suppression and Detection Research Application Symposium*, pp. 439~447, 2001.
- 7) 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.
- 8) Z.G. Liu, A.K. Kim, D. Carpenter, P.L. Yen, "Portable water mist fire extinguishers as an alternative for Halon 1211", Halon Options Technical Working Conference, pp. 435~439. 2001.