

# 알칼리 금속염을 함유한 미분무수의 헵탄 Pool Fire 소화

박재만 · 신창섭<sup>†</sup>

충북대학교 안전공학과

(2005. 5. 25. 접수 / 2005. 8. 30. 채택)

## Extinguishment of *n*-heptane Pool Fire by Water Mist Containing Alkali Metal Agent

Jaeman Park · Changsub Shin<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received May 25, 2005 / Accepted August 30, 2005)

**Abstract** : An experimental study is performed for extinguishing of *n*-heptane pool fire by water mist containing potassium acetate as a fire suppression additive. Water mist was generated by a single pressure nozzle in a small-scale chamber. The drop size distribution of water mist was measured using laser diffraction(Malvern particle sizer). The flame temperature, oxygen concentration and carbon monoxide concentration were measured.

In case of using additives, the fire extinguishing time was shorter than that of pure water at a given discharge pressure and it was because the momentum of a water droplet containing additives was increased.

And also dissociated metal atoms, potassium, were reacted as a scavenger of the major radical species OH, H which were generated for combustion process. Moreover, at a high pressure of 4MPa, the fire was extinguished through blowing effect as well as primary extinguishing mechanisms.

**Key Words** : water mist, additive, potassium acetate

### 1. 서 론

오존층 파괴물질의 규제에 관한 국제협약인 몬트리올 의정서<sup>1)</sup>에 의거 할로겐 계열 브롬원소를 함유한 소화제용 가스인 할론은 생산 및 사용이 금지되고 있는 상황이며 이에 따라 대체 소화약제의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

스프링클러나 일반 물분무 소화설비는 유류화재나 전기화재, 특히 최근 증가하고 있는 식용유화재(주방화재, K급)에 적용할 수 없을 뿐만 아니라 대량의 물을 사용하기 때문에 소화 후 물에 의한 2차적 피해가 발생하는 단점이 있다.

한편 미분무수는 물 액적의  $Dv_{0.99}$ 가  $1000\mu\text{m}$  이하인 물분무<sup>2)</sup>로 소화 후 수손피해가 적고 일반화재, 유류화재, 전기화재 등에 적용이 가능하기 때문에 가스계 소화설비의 대체 소화설비로써 일반적

으로 간주되고 있다.

미분무수의 주요 소화 메커니즘은 기본적으로 세 가지 영향으로 알려져 있는데, 가연물 표면 혹은 화염의 열을 제거하는 냉각효과, 물 액적의 수증기로의 증발에 따른 부피팽창에 의한 공기내 산소의 희석효과, 화염과 가연물 사이의 복사열 차단에 의한 화염전파 속도를 감소시키는 효과로 볼 수 있다<sup>3)</sup>.

소화약제로써 물의 특징은 큰 비열로 인해 많은 열을 흡수할 수 있으며, 증발잠열이 크기 때문에 수증기로 기화시 주위로부터 많은 열을 흡수하여 가연물을 냉각시킨다. 이러한 물의 소화성능을 향상시키기 위해서 첨가제의 사용과 같은 방법이 시도되어 왔는데, 가장 광범위하게 사용되고 있는 것이 포 소화약제이다.

한편 Lazzarini 등<sup>4)</sup>은 수산화나트륨을 첨가제로 하여 미분무수의 소화성능 향상에 관한 연구를 통해 할론 1301( $\text{CF}_3\text{Br}$ )에 비해 알칼리 금속이 더 강한 화학적 효과로 인해서 소염성능이 증대된다고 보고

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
csshin@chungbuk.ac.kr

하였다.

Finnerty 등<sup>5)</sup>은 전투차량에 설치되는 물분무 소화 시스템의 적용을 위한 실험에서 한랭한 지역에서 사용시 소화약제의 동결방지가 중요한 사항이며, 이를 해결하기 위해 특정한 첨가제를 물에 혼합할 경우 동결문제를 해소할 수 있을 뿐만 아니라 화재억제 효과도 증대시킬 수 있다고 보고하였다.

노즐로부터 생성된 물 입자는 고압으로 방수될 경우 충분한 운동량을 지니게 되고 화염의 부력을 뚫고 심부까지 도달하여 연료표면의 냉각 및 화염의 냉각을 통해 소화에 이르게 할 수 있다.

그러나 Downie 등<sup>6)</sup>이 연구한 바에 의하면, 미립화된 물 액적이 충분한 운동량을 갖고 있지 않을 경우 화염의 플럼에 대한 침투력이 저하되어 물 액적이 화염의 심부까지 도달하지 못하고 화염 주위로 빗겨나가 결국에는 방수되는 대부분의 미분무수가 소화활동에 사용되지 못한다고 하였다.

금속염 첨가제를 함유한 물 액적은 질량 증가에 따른 운동량 증가로 인해 미분무수의 화염에 대한 침투력을 향상시킬 것으로 예상할 수 있다.

최근 미분무수 소화설비의 주요 해결 문제 중 하나는 저압시스템에서의 효율향상인데, 이는 기존의 스프링클러 설비와의 호환성과도 관련이 있는 것으로, 이러한 저압시스템에서의 미분무수의 소화성능을 향상시키기 위한 방법 중에서 첨가제를 이용하는 것은 충분히 고려할 수 있는 것이다<sup>7)</sup>.

위와 같이, 일련의 연구자들의 보고서를 통해서도 알 수 있듯이, 미분무수의 물리·화학적인 소화성능 향상과 사용상의 단점을 극복하기 위해서 첨가제의 사용이 중요하며, 이러한 첨가제가 미분무수의 소화메커니즘에 어떠한 영향을 끼치는지 분석하는 것이 필요하다.

한편 알칼리 금속염에 대한 기존의 소화특성 연구로는 컵버너를 이용한 소화농도 측정, CHEMKIN에 의한 시뮬레이션 분석, 물분무(spray)에 대한 적용실험, 액적의 증발특성 분석 등으로 아직까지 미분무수에 적용한 실험결과는 충분하지 못한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 알칼리 금속염 첨가제를 함유한 미분무수의 소화성능을 연구하고자 아세트산 칼륨을 물에 소량 첨가하여 헵탄 pool fire에 대한 소화실험을 실시하였고, 이때 화염의 온도, O<sub>2</sub>(Oxygen) 농도 및 CO(Carbon Monoxide) 농도를 측정하여 첨가제에 의한 미분무수 소화특성을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

소화실험은 Fig. 1에 나타냈듯이 스테인리스강 재질의 환기가 원활한 연소실 (0.75m×0.75m×1.3m)에서 수행되었다. 연소실의 전면은 소화현상을 관찰할 수 있도록 강화유리로 제작하였으며, 좌우 하부에 개구부(0.5m×0.1m)를 설치하여 0.58m<sup>3</sup>/s의 유량으로 상온의 주변공기가 유입될 수 있도록 하였다.

연료팬(0.15m×0.15m×0.05m)은 연소실 바닥의 중앙에 위치하였고, 화염의 온도 측정을 위해 연료팬 상부 5cm 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 O<sub>2</sub>와 CO의 농도를 측정하였다.

점화 후 180sec 후에 미분무수를 방출하였으며 각각의 소화실험은 3내지 4회의 반복실험을 통해서 평균적인 소화시간 및 화염온도, 가스농도를 얻을 수 있도록 하였다.

미분무수가 방수되지 않는 조건에서 자유연소를 통한 300mL 헵탄 pool fire의 연소속도를 측정하였고, 이를 통해 평균연소속도(mean burning rate, kg/m<sup>2</sup>s)와 열방출률(heat release rate, kW)을 계산하였다<sup>8)</sup>.

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

첨가제를 넣지 않은 물에 대해서 액적 크기 분포는 광산란 기법을 이용한 Malvern 입자 측정 장치(Mastersizer S)로 노즐로부터 하방 1m 높이에서 방수압력 2, 4MPa에서 측정하였고, 노즐의 분무각은 3CCD digital video camera (SONY DCR-VX 1000)

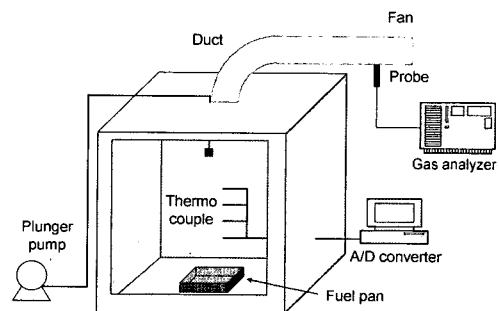


Fig. 1. Schematic of experimental set-up.

를 이용하여 실험압력 2, 4MPa에서 약 10회씩 촬영하였다.

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

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

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

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 노즐 분무 특성

미분무수는 NFPA 750의 정의에 의하면 노즐의 최소설계작동압력에서 방수되는 물 액적의  $Dv_{0.99}$ 가  $1000\mu\text{m}$  이하인 물분무를 말하며, 물 입자의 크기에 따라 Class 1, 2, 3급으로 구분한다.

Class 1급에 해당하는 미분무수는  $Dv_{0.9} \leq 200\mu\text{m}$ 인 경우이며, 이 상태는 가장 미세한 물방울 상태이다.

Class 2급 미분무수는  $200\mu\text{m} < Dv_{0.9} \leq 400\mu\text{m}$ 의 경우이며, 이와 같은 미분무수는 큰 물방울이 존재하기 때문에 Class 1급 미분무수에 비하여 유량이 많다. 미분무수 입자의 크기는 액체 연료 화재에 효과적일 정도이며, 이 범위에서는 표면을 적시는 효과가 높은 편이기 때문에 Class 2급 미분무수는 일반화재에도 효과적이다.

Class 3급 미분무수는  $400\mu\text{m} < Dv_{0.9} < 1000\mu\text{m}$ 의 경우이며, 이와 같은 미분무수는 일반화재에 적합하며 상황에 따라 유류화재의 제어 또는 소화에 사용할 수 있다.

Malvern 입자 측정 장치를 이용하여 노즐로부터 1m 떨어진 지점에서 측정한 체적 중간값 직경(volume median diameter,  $Dv_{0.5}$ )은 Fig. 2, 3에 나타냈듯이 방수압력 2MPa에서  $96\mu\text{m}$ , 4MPa에서  $91\mu\text{m}$ 이

었으며, 압력증가에 따라 입자의 크기( $Dv_{0.5}$ )는 평균적으로 5.2% 감소하였다.

Fig. 4에는 방수압력 2MPa과 4MPa에서의 3CCD digital video camera를 이용하여 촬영한 노즐의 분무 장면을 나타내었다. 분무되는 소화약제는 일반 수돗물이며 분무각 측정을 위한 사진판독 방법은 포토샵(Adobe Photoshop) 프로그램을 이용하여 분석하였고, 측정된 분무각은 2MPa과 4MPa에서 약  $55^\circ$ 를 나타냈다.

또한 실험상의 작동압력 1.2, 2, 4MPa에서 노즐로부터 방수되는 유량은 평균적으로 각각 0.42, 0.54, 0.72L/min이었다. 압력증가에 따라 분무각은 변하지 않았으므로 단위면적당 방수되는 유량밀도는 증가하는 것을 알 수 있고, Fig. 4를 통해서 육안상으로도 유량밀도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

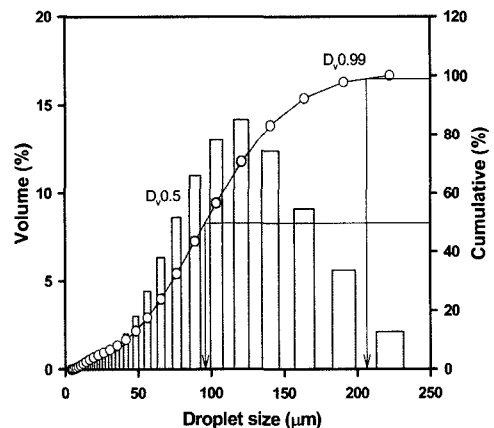


Fig. 2. Cumulative volumetric distributions of the measured droplet size at a pressure of 2MPa.

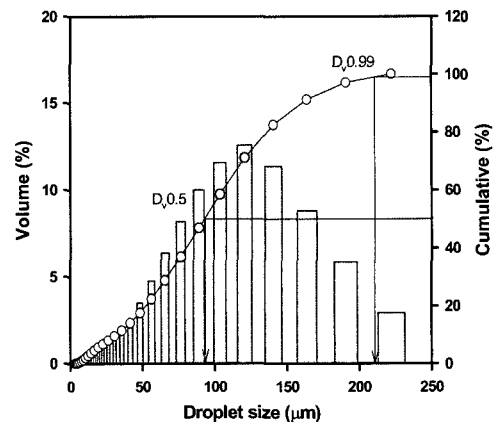


Fig. 3. Cumulative volumetric distributions of the measured droplet size at a pressure of 4MPa.

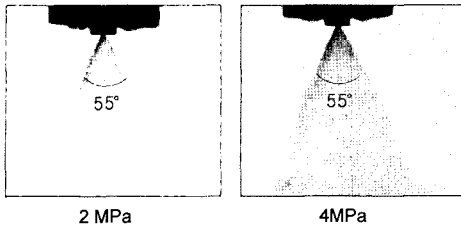


Fig. 4. Discharge angle of the tested nozzle.

Table 1. Specifications of the tested nozzle

	1.2MPa (Low)	2MPa (Intermediate)	4MPa (High)
Droplet size, $Dv_{0.5}$ ( $\mu\text{m}$ )	·	96	91
Spray angle (degree)	·	55	55
Orifice diameter (mm)	0.7	0.7	0.7
Flow rate (L/min)	0.42	0.54	0.72
Calculated velocity (m/s)	4.58	5.85	7.80
Calculated average droplet mass (kg)	·	$4.63 \times 10^{-10}$	$3.94 \times 10^{-10}$
Calculated average droplet momentum ( $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ )	·	$2 \times 10^{-9}$	$3 \times 10^{-9}$

실험에 사용된 노즐의 오리피스 직경은 0.7mm 이었고, 연속방정식에 의해서 오리피스 말단에서의 유속을 계산하면 1.2MPa에서 약 4.547m/s이었다. 같은 방법으로 압력 증가에 따른 유속의 증가 및 그 외 노즐의 특성 값을 Table 1에 나타내었다.

한편 단순히 액적의 평균직경만으로 산출한 각각의 액적의 질량과 이에 따른 운동량(속도×질량)값을 Table 1에 나타내었는데, 4MPa에서의 계산에 의한 액적의 질량이 2MPa에서의 질량보다 다소 낮게 나타난 반면, 운동량은 속도증가에 의해 증가함을 알 수 있었다. 이는 물론 공기와의 저항 등을 고려하지 않은 상태에서 노즐로부터 방출된 물 액적의 평균속도가 일정하다는 가정 아래서이다.

### 3.2. 첨가제에 의한 소화약제의 물성변화

Table 2에는 실험에 사용된 순수물과 수용액의 물리적 특성치를 측정하여 나타내었는데 Yang 등<sup>12)</sup>의 결과에 의하면 칼륨염의 함량 증가에 따라 밀도, 점도는 증가하였고 60wt.%의 경우 표면장력은 순수물에 비해서 감소하였다.

수용액의 밀도는 10wt.% 칼륨염의 경우 1049.56 kg/m<sup>3</sup>으로 5.1% 순수물에 비하여 증가하였다. 밀도의 증가는 소화를 위한 분무시 액적의 운동량을 그만큼 증가시킬 수 있는 효과가 있고 이에 따라 화염면으로의 액적의 침투를 증가시킬 수 있어 소화효율을 높일 수 있다.

Table 2. Physical properties of the solution

Fluids	Density @20°C (kg/m <sup>3</sup> )	Dynamic viscosity @20°C (Ns/m <sup>2</sup> )	Surface tension @20°C (N/m)	Freezing point (°C)	pH @20°C
Distilled water	998.23	0.00089	0.072	0	7.0
10% K-acetate	1049.56	0.00096	0.073	-7.5	9.8

수용액의 점도는 약 7.9% 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 순수물에 비해서 1.4% 증가하였고, 소화시 표면장력의 증가는 소화작용에 복합적인 영향을 줄 수 있는데, 일반적으로 계면활성제를 1%이하로 첨가하여 표면장력을 저하시킴으로써 물의 침투, 흡수작용을 강화한다.

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

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

### 3.3. 소화 특성

미분무수가 방수되지 않는 조건에서 자유연소를 통한 헵탄 pool fire의 연소속도를 측정된 결과, 평균연소속도는 0.025kg/m<sup>2</sup>s, 열방출률은 25.09kW이었다. 300mL의 헵탄을 자유연소 시킬 경우 평균적으로 380sec(6' 20")동안 연소가 이루어졌다. Table 3에는 각 경우에 있어서의 화염이 소화 혹은 소멸되는 시간을 나타내었다.

첨가제를 넣지 않은 일반 수돗물의 경우는 고압(4MPa)에서만 화염이 소화되었고 저압(1.2MPa)과 중압(2MPa)에서는 소화가 되지 않았다. 저압(1.2MPa)에서 미분무수를 방수한 경우 자유연소시 보다 더 오랫동안 연소가 지속되었으며, 중압(2MPa)에서는 자유연소시와 비슷한 연소 시간을 나타내었다.

노즐로부터 방수되는 물 액적의 운동량이 화염의 풀럼을 뚫을 만큼 충분치 못한 경우, 액적은 화염 주변으로 빗겨나가 화염을 감싸게 되고 이로 인해 열방출률과 연료의 연소속도는 줄어들게 된다.

Table 3. Fire out times of n-heptane pool fire

		1.2MPa (Low)	2MPa (Intermediate)	4MPa (High)
Tap water	1st	7'29"81	6'33"85	3'44"08 <sup>a)</sup>
	2nd	7'29"80	6'04"66	3'10"52 <sup>a)</sup>
	3rd	7'01"54	6'11"19	3'31"29 <sup>a)</sup>
	4th	.	.	3'09"70 <sup>a)</sup>
10wt.% K-acetate	1st	7'37"69	3'18"22 a)	3'20"84 <sup>a)</sup>
	2nd	7'48"84	3'57"29 a)	3'04"42 <sup>a)</sup>
	3rd	7'43"90	4'52"81 a)	3'07"45 <sup>a)</sup>
	4th	.	4'35"11 a)	3'08"74 <sup>a)</sup>

a) fire extinguished

따라서 Fig. 5에서 알 수 있듯이 본 실험에서 저압의 경우 헵탄의 총 연소시간은 늘어나게 되었다<sup>9)</sup>. 이러한 현상은 첨가제를 넣었을 경우 저압에서 좀 더 뚜렷이 나타나는데 칼륨에 의한 부촉매 효과 및 단일 액적의 평균증발속도 감소로 인해서 연소가 더욱 지연되었기 때문이다.

Fig. 6에서 중압의 경우 아세트산 칼륨 첨가제를 넣었을 때, 화염이 소화된 것은 동일 압력에서 입자의 속도가 일정하다고 가정할 경우, 첨가제를 함유한 단일 액적은 중량 증가에 따른 운동량 증가로 더욱 화염의 심부, 즉 화학 반응과 공기 유입에 의해서 화염이 지속되는 영역(persistent zone)-연료표면까지 도달할 수 있다<sup>10)</sup>.

이곳에서 액적이 증발과정을 거치며 결정을 이루게되고 연소의 연쇄반응을 이끄는 H와 OH 라디칼의 포착체로 작용함으로써 연쇄반응의 연결고리가 끊어지게 된다. 이와 같은 이유로 인해서 소화가 이루어진다고 판단할 수 있다.

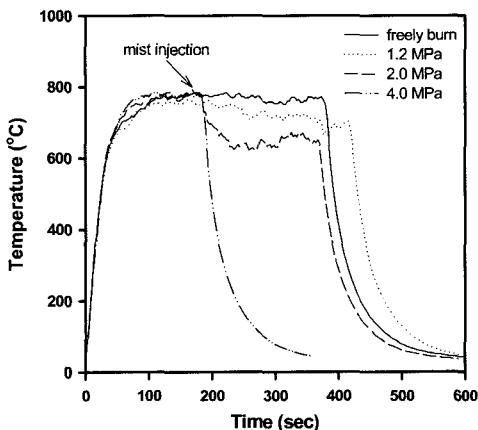


Fig. 5. Flame temperature variation of n-heptane pool fire under water mist application.

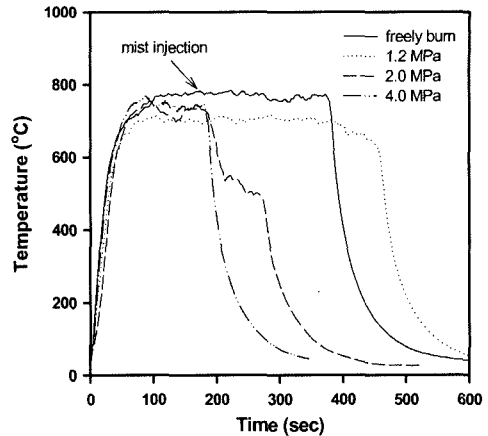


Fig. 6. Flame temperature variation of n-heptane pool fire under water mist application containing 10wt.% K-acetate additives.

고압의 경우는 위에서 설명한 소화 메커니즘 이외에도 blowing(연료표면의 유증기를 날려버리는 것) 효과에 의해서 화염이 소화되는 것을 관찰할 수 있었다<sup>11)</sup>.

소화성능 향상을 위한 목적으로 첨가제를 사용하는 것은 Yang 등<sup>12)</sup>의 연구결과를 고려할 필요가 있다.

즉 첨가제를 함유한 물 액적이 화염의 플러를 뚫고 화염의 중심부까지 도달한다면, 염에 의한 화학적 효과로 소화활동이 증진되어 첨가제에 의한 물 액적의 증발속도의 감소는 소화활동에 중요한 인자가 되지 않는다.

그러나 본 실험의 저압에서의 결과와 같이 물 액적의 운동량 부족으로 액적의 대부분이 화염으로부터 빗겨난다면 첨가제에 의한 화학적 소화효과는 최소 혹은 상실하게 되고 단위 시간에 더 적은 양의 수증기가 생성되어 소화활동에 단점으로 작용할 수 있다.

본 실험에서 측정된 O<sub>2</sub>의 농도는 화염부근이 아닌 덕트에서 측정된 것이기 때문에 Fig. 7, 8의 결과로 질식효과의 유무를 판단하기는 어렵다. 단지 첨가제를 넣었을 경우 연소에 의한 시간당 O<sub>2</sub> 소모량이 적게 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 유입되는 공기량이 충분한 조건에서 화염의 크기가 작아짐으로써 상대적으로 연소반응으로 소모되는 O<sub>2</sub>의 양이 적어지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 9, 10에는 CO의 농도변화를 나타내었는데, 첨가제를 넣은 경우 칼륨의 부촉매 효과에 의한 불완전연소로 인해서 CO의 발생량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 환기가 원활하지 않은

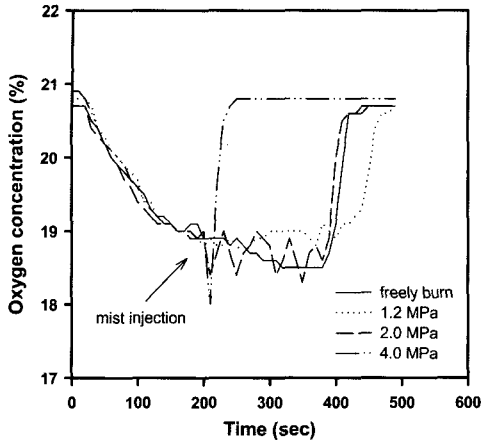


Fig. 7. Oxygen concentration of n-heptane pool fire under water mist application.

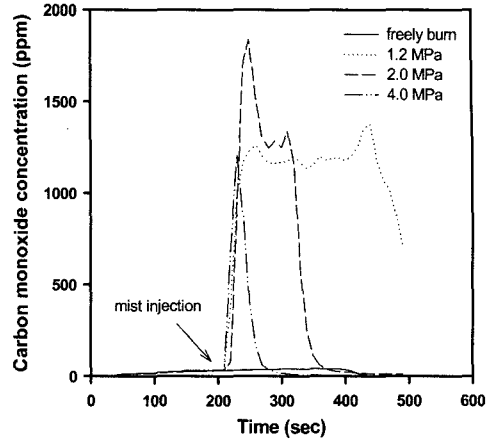


Fig. 10. Carbon monoxide concentration of n-heptane pool fire under water mist application containing 10wt.% K-acetate additives.

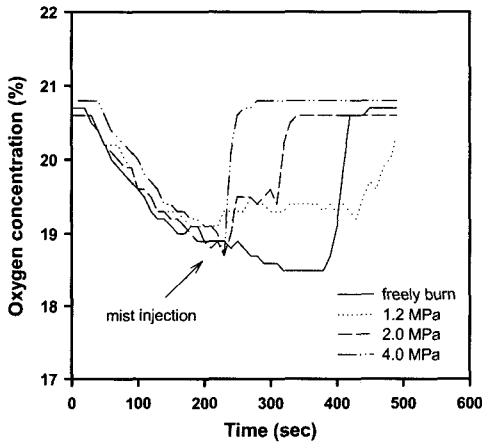


Fig. 8. Oxygen concentration of n-heptane pool fire under water mist application containing 10wt.% K-acetate additives.

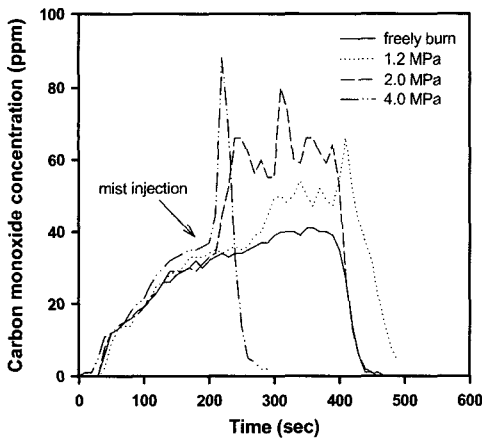


Fig. 9. Carbon monoxide concentration of n-heptane pool fire under water mist application.

밀폐된 공간에 미분무수 소화시스템을 적용하는 경우 첨가제의 사용으로 인한 CO 농도 증가를 고려해야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구는 첨가제를 함유한 미분무수의 소화성능을 분석하기 위해서 첨가제로써 화재억제제를 함유한 수용액의 소화특성에 대한 분석을 실시하였다. 소화성능을 향상시킬 수 있는 첨가제로 아세트산 칼륨을 물에 중량비로 10% 첨가하여 헵탄 pool fire에 대한 소화실험을 수행하여, 화염의 온도 및 O<sub>2</sub> 농도, CO 농도를 측정하여 첨가제를 넣지 않았을 경우의 미분무수 소화특성과 비교하였다.

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

미분무수의 소화성능 향상을 목적으로 알칼리 금속염 첨가제를 사용하는 경우 노즐에서의 방수압력이 일정압력 이상일 경우 헵탄 pool fire 소화에 있어 효과적이었고 첨가제로 인해서 수용액의 밀도, 점도 등이 증가한 반면 pH가 염기성을 나타내었으며

소화시 CO의 농도가 일시적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) United Nation Environmental Program (UNEP), "Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer", 1987.
- 2) NFPA 750 : Standard on Water Mist Fire Protection Systems. National Fire Protection Association, 2003.
- 3) Z. Jiang, W.K. Chow, J. Tang, S.F. Li, "Preliminary study on the suppression chemistry of water mists on poly(methyl methacrylate) flames", Polymer Degradation and Stability, Vol. 86, Issue 2, pp. 293~300, 2004.
- 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) A.E. Finnerty, R.L. McGill, W.A. Slack, "Water-based halon replacement sprays", ART-TR-1138, U.S. Army Research Lab., 1996.
- 6) 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.
- 7) B.A. Williams, J.W. Fleming, "Suppression mechanisms of alkali metal compounds", Halon Options Technical Working Conference, pp. 157~169, 1999.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) A.K. Kim, "Improvement of water mist performance with foam additives", Proceedings of Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, pp. 439~447, 2001.
- 12) 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.