한국화재소방학회 논문지, 제23권 제2호, 2009년
[논 문]

J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 23, No. 2, 2009

미분무수 소화설비의 소화특성 실험

Experimental Study on the Fire Extinguishing Characteristics of Water Mist System

황원준† · 김황진* · 오규형** · 이성은***

Won-Jun Hwang† · Hwang-Jin Kim* · Kyu-Hyung Oh · Sung-Eun Lee*****

삼성전자, *호서대학교 대학원,
**호서대학교 소방방재학과, ***호서대학교 산업안전기술연구센터
(2009. 2. 2. 접수/2009. 4. 16. 채택)

요 약

본 연구에서는 형식이 각기 다른 3종류의 미분무수 노즐을 사용하여 방사높이와 화염의 위치 변화에 따른 소화성능 실험과 포 소화약제를 혼합한 소화성능 실험을 수행했다. 소화성능 실험에서는 미분무수 노즐의 높이를 4m, 3.5m, 3m로 변화를 주었으며 연료 팬을 노즐 중심으로부터 0m, 0.5m, 1m의 변화를 주었다. 포 소화약제는 3%형 AFFF(Aqueous Film Forming Foam)를 사용하였다. 실험결과 개구부의 유무는 소화에 미치는 영향이 적었으며, 포 소화약제를 혼합한 미분무수의 소화성능은 약제를 혼합하지 않은 경우에 비하여 우수하였다.

ABSTRACT

We carried out fire extinguishing experiments with three kinds of water mist nozzle system. Fire extinguishing experiment according to installed nozzle height and fuel pan location was done. And fire extinguishing performance was compared with plain water and foam agent mixed solution. Water mist nozzle height was varied with 4m, 3.5m and 3m and position of fuel fan was varied 0.5m and 1m from the center of water mist nozzle. Foam agent that used in this experiment is 3% type of AFFF (Aqueous Film Forming Foam) solution. Experimental result showed the door opening effect was little. Fire extinguishing performance of foam agent mixture water mist was better than the plain water mist only.

Keywords : Water mist, Fire extinguishing, Foam agent

1. 서 론

우리나라의 경우 화재 통계상 방재분야에 비교적 선진국인 독일, 미국, 일본, 호주 등에 비교하여 연간 발생하는 화재의 건수는 작으나 그로 인한 인명의 피해는 많다.[1)]

이러한 인명피해는 대부분이 관리의 부족이나 설비적 결함에 의한 화재 발생시 신속한 진압이 어려울 뿐만 아니라 인명과 재산상 막대한 손실을 가져다준다. 특히 산업현장에서의 경우 직접적인 재산손실 뿐만 아니라 복구비용, 대외 이미지 실추 등 부가적인 손실비용은 천문학적이라고 할 수 있다.

이에 따라, 화재의 신속한 진압을 위하여 지속적인 연구 개발이 이루어지고 있다.[2,3)] 물은 가장 기본적 소화설비의 매개체로 냉각효과와 더불어 경제성이 뛰어나지만, 2차적인 수손피해를 초래하는 부작용이 나타나기도 한다.[4)]

미분무수를 이용한 소화설비는 작은 양의 소화 용수로 화재진압을 가능하게 할 뿐 아니라 2차 수손피해를 최소화시킬 수 있는 소화시스템으로서 국내에서도 관련 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며,[5)] 최근에는 전량 수입에 의존했던 노즐 및 시스템의 국산화율도

† E-mail: wonjun0615.hwang@samsung.com

높아지고 있는 실정이다.[6] 하지만 수입제품과 동등한 성능의 미분무수 노즐 개발이 주로 이루어졌으며, 비용 경쟁력이 우수한 설비개발 및 소화성능을 향상시킬 수 있는 연구 등은 미미한 실정이다.

본 연구에서는 약 71m^{3}의 방호체적 공간에서 B급 고임화재(pool fire)를 대상으로 노즐의 높이 및 화염의 위치 변화와 문의 개폐 여부에 따른 미분무수 소화성능실험을 실시하고 3% 형의 AFFF 소화약제를 첨가하였을 경우의 소화효과를 고찰함으로서 미분무수 노즐의 최적 설치 방안과 소화성능 향상 방안에 대하여 연구하고자 하였다.

물은 다른 소화약제보다도 화재를 억제소화하기 위한 높은 비열과 증발잠열 등의 가장 좋은 물리적 특성을 가지고 있으며, 증발될 때 약 1,650배의 증기팽창을 하게 되므로 화염주변에서의 산소농도 희석과 연료로부터 발생되는 증기를 희석시킨다. 또한, 물을 50~300μm로 미립화하여 분산시키게 되면 입자의 표면적이 넓어지므로 물과 화염 표면 사이의 열전달 속도가 증가하여 빠르게 수증기로 바뀌면서 주위의 수증기 함량이 늘어나 화재의 확대가 억제되고 연소실내의 산소농도의 저하와 증기의 희석 및 질식효과로 소화효과를 증대시킨다.[7]

이러한 미분무수의 적용에 따른 화재의 소화 메커니즘은 화재영역으로부터 미분무수의 증발에 의한 산소의 희석속도 등에 의해 결정되며, 유량밀도의 분배, 물방울의 크기, 속도, 분무각도, 분무 형태, 운동량 및 분사특성과 같은 여러 인자들에 의해 그 영향정도가 결정된다.[8]

그 중에서도 소화성능에 있어 가장 중요한 변수는 미분무수의 입자크기이며, 소화성능에 이용되는 미분무수의 입자크기에는 하한치가 존재하게 된다. 그 이유는 화염으로부터 발생되는 고온의 난류성 가스의 흐름을 극복할 수 있는 에너지를 가질 수 있을 만큼 충분한 운동량을 가지고 있어야 하기 때문이다. 이러한 미분무수 입자의 화재기류 침투에 대한 능력은 노즐로부터 방사된 미립자가 중력과 마찰력이 동일하게 되는 종속도에 의해 결정된다.[9]

Andersson은 실온의 공기 중에 증발을 무시한 물 입자에 대한 종속도 Vterm(terminal velocity)를 제시하였다.[4] NFPA에서는 1,000μm 이하에서의 종속도는 약 5.6m/s를 나타내며, 2,500μm 이상에서는 물방울 입자의 종속도는 9.3m/s 이상이라고 보고하고 있다.[7]

하지만, 종속도가 빠를수록 소화되는 시간이 짧아지는 것은 아니다. 무상이 아닌 적상 주수의 경우에는 유류화재에 적합하지 않기 때문이고, 이는 화재의 특성 및 소방대상물에 따라 다르기 때문이다.

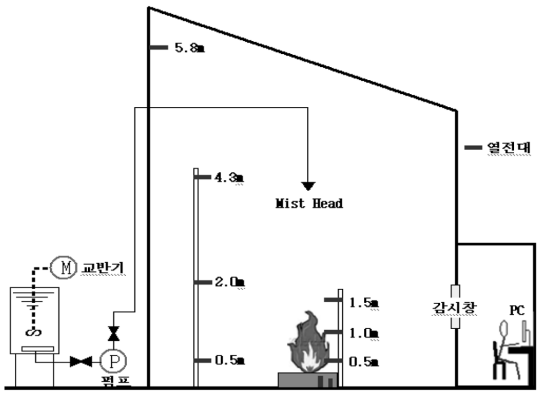

Figure 1. Schematic diagram of experimental set up.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 미분무수 노즐을 이용하여 B급 고임화재(pool fire)에 대한 소화성능 특성에 대한 실험과 노즐의 높이 및 화염면에 대한 위치변화에 따른 소화특성을 살펴보았고 불소계 계면활성제인 수성막포(AFFF)를 혼합한 경우의 소화효과에 대하여 비교 실험하였다. Figure 1은 본 실험 장치에 대한 개략도로서, 실험실은 가로 세로 높이(평균)가 각각 3m, 5m, 5m이고 벽면의 재질은 유리섬유가 충진된 조립식 판넬을 사용하여 조립하였다. 고압 펌프는 약 10Mpa의 압력에서 분당 26리터 이상의 공급이 가능한 플런져 펌프를 사용하였고, 조작스위치, 압력조절기, 체크밸브 등으로 구성되며, 미분무수 노즐은 스월러(Swirl)를 장착한 노즐 및 몸체에 직접 오리피스를 가공한 일체형 노즐 등의 두 가지 타입을 사용하였다.

화염의 크기에 따라 실험실 내부의 온도, 화염온도, 시간에 따른 연료와 연료의 열손실을 가능한 일정한 조건으로 유지하기 위해, 연료팬 내부, 연료팬 중앙 수직방향, 실험실 벽면, 배기구 등에 9개의 열전대를 설치하였으며, 매초 1회씩 스캔하면서 온도를 측정하여 노트북에 저장되도록 하였다.

또한, Table 1과 Table 2에 미분무수 노즐과 수성막포의 기본적인 데이터를 나타내었다.

2.2 실험방법

미분무수 노즐의 방사높이와 화염면의 특성에 따른 소화성능 실험과 미분무수 노즐의 중심거리로부터 화

Table 1. Specification of Water Mist Nozzle

	A Type	B Type	C Type
Nozzle Type	Multi Orifice	Swirl	Multi Orifice
K-factor	0.64	2.7	2
SMD (μm)	35	50	-
Flow Rate (L/min)	6.4	27	24
Operating Pressure (Mpa)	10~11		
Spray Angle (°)	70	60	75
Spray Type	Full-cone Type/Single Fluid		
Thread Type	3/8" BSP		

Table 2. Physical Properties of the AFFF Foam

Concentration Type	Specific Gravity	Viscosity	Storage Temp. (°C)	pH (20°C)	Color
3%	1.035	5.5cst	−10~30°C	8	Rose Pink

염면 이동에 따른 최적소화 조건 도출실험, 수성막포를 혼합한 소화약제의 소화성능 실험으로 나누어 수행하였다. 각각의 실험에서 문을 개방한 경우와 닫고 실험을 하면서 개폐에 대한 영향도 살펴보았다.

2.2.1 소화성능 실험

소화성능 실험은 미분무수 입자와 방사량이 다른 3개의 미분무수 노즐을 이용하여 0.5단위, 1단위, 2단위 3개의 화염면의 크기에 대하여 실험하였다.[10)]

실험 순서는 먼저 물탱크에 물을 가득 채우고 연료팬에 B급 소화성능 실험에 준하여 물과 헵탄을 채운다. 열전대를 확인하여 온도 측정 및 저장 준비가 되면 연료를 점화시킨다. 착화 후 60초가 되면 정상적인 연소를 하여 화염온도는 최대까지 상승하게 되며 이때 펌프의 스위치를 작동하여 미분무수를 방사한다. 방사 후 소화될 때까지의 시간은 연료면 0.5m 높이에 설치된 열전대의 온도기록을 통해서 알 수 있으며 스톱워치를 병행하여 측정하였다. 한 번의 실험이 끝나면 실험실 내부의 온도가 동일한 조건이 될 때까지 약 20분간 냉각한다. 재 실험 전에 연료팬에 있는 물과 연료의 양을 보충하여 초기화시킨다. 화염면으로 부터 4m 높이에서의 방사실험이 종료되면 어댑터를 이용하여 노즐의 높이를 각각 3.5m, 3m로 조절하면서 실험을 반복하였다.

2.2.2 화염면 위치 변화에 대한 소화실험

미분무수 노즐을 4m, 3.5m, 3m로 상하로 조정하면서 연료팬을 노즐 중심으로부터 0.5m, 1m를 이동하면서 최적소화 실험을 하였다. 이는 미분무수 노즐을 외형상 분류할 경우, 노즐 몸체 중심에 오리피스가 존재하는가에 따라 그 성능이 달라지기 때문이다. 최적화 실험의 특징은 반복성과 재현성이 가능할 경우에 적용할 수 있으므로, 이번 연구에서는 B급 고임화재 1단위에 대하여만 실험하였다. 실험방법과 순서는 다음과 같다.

가) A형 미분무수 노즐을 각각 4m, 3.5m, 3m에 고정시키고 미분무수 방사 실험을 실시하고 B형과 C형의 미분무수 노즐을 각각 교대로 동일 실험을 실시하였다.

나) 미분무수 노즐의 높이에 따른 실험이 종료되면 연료팬을 중심으로부터 0.5m와 1m 씩 이동하며 반복실험을 하였다.

다) 연료의 양과 실험실 내부의 온도 냉각 및 온도측정 대기시간은 위의 2.2.1과 동일하게 실시하였다.

2.2.3 수성막포를 혼합한 소화성능 실험

수성막포를 혼합한 용액을 이용하여 미분무수의 입자크기가 작은 노즐(50~130μm)과 상대적으로 큰 노즐(150~830μm)의 미분무수 노즐을 사용하여 소화성능 및 최적조건 도출 실험을 실시하였으며 방법과 순서는 다음과 같다.

우선 200*l*의 물탱크에 190*l*의 물을 채우고 물탱크에 비이커를 이용하여 수성막포 6*l*를 혼합한 후 다시 물 4*l*를 넣어 3% 수용액을 만든 다음 물탱크 상부에 설치한 교반기를 이용하여 30분 이상 교반한다. 교반이 완료되면 3.2.1 및 2.2.2의 방법과 같이 소화성능실험을 실시하였다. 이때 연료의 양과 실험실 내부의 냉각 및 대기시간은 3.2.1과 동일하게 실시한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 노즐 설치높이에 따른 소화성능

미분무수 입자의 크기와 방사유량이 각기 다른 노즐을 이용하여 방사 높이를 4m, 3.5m, 3m로 변화시켰고 화염면의 크기는 0.5단위, 1단위, 2단위로 변화시키면서 소화성능 실험하였다. 이때 미분무수 노즐은 연소 팬의 중심에 위치시켰다. Figure 2, Figure 3, 및 Figure 4는 2단위 화재에서 미분무수 노즐의 설치높이에 따른 각 유형별 노즐의 미분무수 방사시 화염온도 변화를 나타낸 것으로 착화 후 온도가 600~800°C까지 상승하였다가 온도가 급격히 낮아지는 부분이 소화되는 시간을 나타낸다.

자유연소 시에는 약 150초간 연소 후 소화됨을 나타

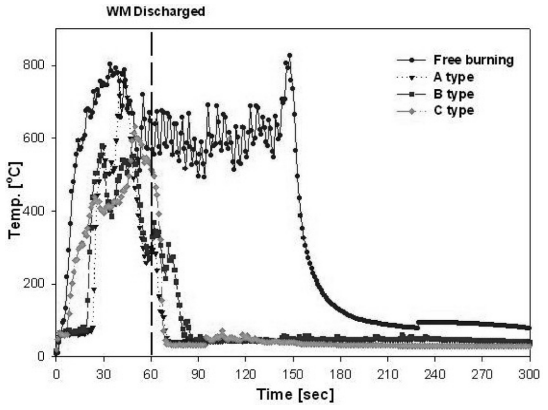

Figure 2. Temperature profile of 2-unit scale n-heptane fire during fire extinguishing according to the nozzle type at 4m head height.

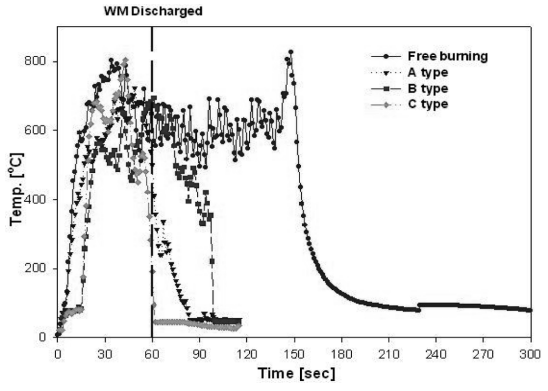

Figure 3. Temperature profile of 2-unit scale n-heptane fire during fire extinguishing according to the nozzle type at 3.5m head height.

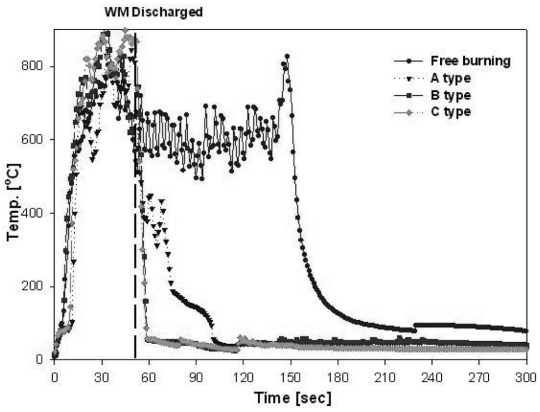

Figure 4. Temperature profile of 2-unit scale n-heptane fire during fire extinguishing according to the nozzle type at 3m head height.

Table 3. Experimental Results of Fire Extinguishing Time According to the Nozzle Hight and Fire Unit

Installed Nozzle Height	Fuel Fan Size	Nozzle Type	Extinguishing time (sec)	
			Door Open	Door Close
4m	0.5unit	A	32	34
		B	17	33
		C	34	91
3.5m	1unit	A	44	50
		B	35	38
		C	9	10
3m	2unit	A	27	25
		B	11	15
		C	10	10

내고 있으나 착화 60초 후에 미분무수를 방사하는 경우 소화시간은 크게 감소함을 보여주고 있다.

Table 3에서 나타난 것처럼 0.5단위와 2단위에서는 미분무수 노즐의 높이가 낮을수록 소화시간이 감소되었으나 1단위에서는 C type을 제외하고는 3.5m 높이에서 증가하는 현상을 나타내었는데 그 원인으로 화재크기와 미분무수의 입경 및 미분무수의 방사에 의한 화염면 주위의 공기 유동 등 유체역학적인 복합적 요인으로 화재 크기에 상관없이 결과가 나타나는 것으로 생각해 볼 수 있다.

3.2 화염면 위치에 따른 소화성능

Table 4에는 노즐을 4m 높이로 고정시키고 1단위의

Table 4. Experimental Results of Fire Extinguishing Time According to the Distance from the Nozzle Center

Distance from the Nozzle	Nozzle type	Extinguishing Time (sec)	
		Door Open	Door Close
0m	A	50	53
	B	42	40
	C	21	24
0.5m	A	273	91
	B	147	64
	C	26	16
1m	A	119	93
	B	254	146
	C	86	149

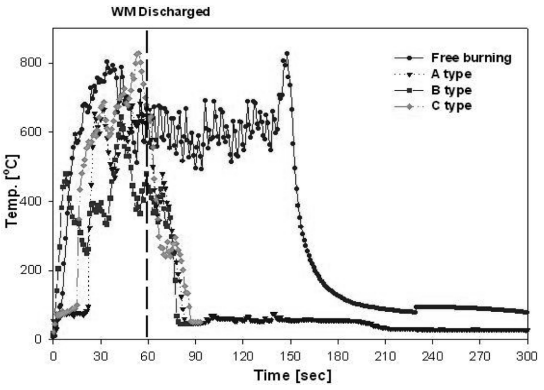

Figure 5. Temperature profile of 1-unit scale n-heptane fire during fire extinguishing at the nozzle center (head height: 4m).

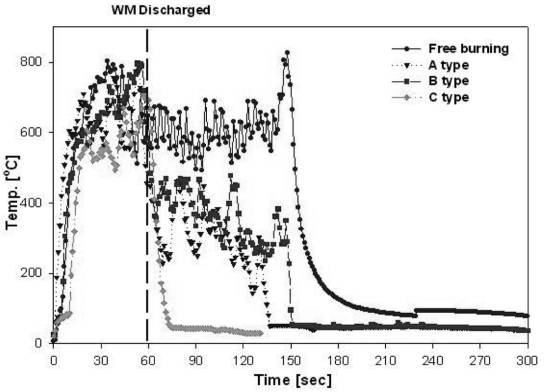

Figure 6. Temperature profile of 1-unit scale n-heptane fire during fire extinguishing at 0.5m apart from center (head height: 4m).

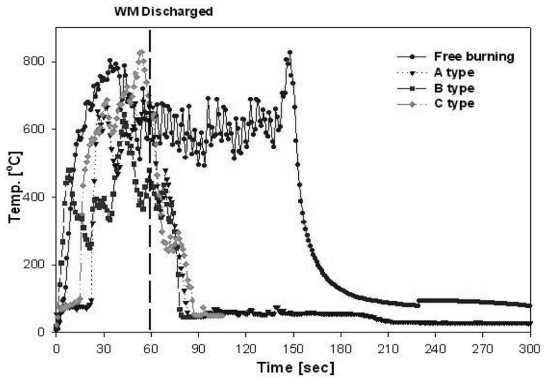

Figure 7. Temperature profile of 1-unit scale n-heptane fire during fire extinguishing at 1m apart from center (head height: 4m).

화염을 미분무수 노즐 중심으로부터 0m, 0.5m, 1m씩 이동시키며 소화실험을 한 결과를 나타내었다.

동일한 크기의 화염에서 미분무수 노즐 중심으로부터 멀어질수록 소화시간이 증가함을 나타내어 직접적인 냉각효과를 발휘하지 못할 때에는 소화시간이 증가하는 양상을 나타내었다.

또한, 문의 개폐에 따른 소화효과를 볼 때, 문을 닫았을 때 빠른 소화시간을 나타내었는데 이는 개방 시에 비하여 열기류의 유동이 적어 유증기 치환에 따른 질식효과가 높아진 것으로 판단된다. Figure 5, Figure 6, Figure 7은 노즐 중심으로부터 거리에 따른 각 유형별 노즐 사용시 화염의 온도 변화의 결과를 나타낸 것이다.

3.3 AFFF 혼합에 따른 소화성능

Table 5에는 1단위와 2단위의 화염을 미분무수 노즐의 중심에 위치시키고 미분무수 노즐의 높이에 따른 소화시간과 물과 AFFF 포 소화약제를 사용하였을 때의 소화시간을 측정하여 나타내었다.

여기서는 c type의 미분무수 노즐을 사용하였다.

Table 5와 같이 미분무수 노즐의 높이가 화염면과 가까워질수록 소화시간이 단축되었으며, 수성막포를 첨가하였을 때 미분무수만을 사용한 것보다 적게는 7%에서 많게는 60%까지 소화시간이 단축된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기존의 선행 연구결과[11]와 일치하는 결과로서, 풀콘 형태의 노즐에서 수성막포의 첨가에 따른 소화성능 향상이 잘 나타남을 알 수 있다.

또한, 문을 닫아 밀폐했을 때보다 문을 열었을 때가 소화시간 단축효과가 더욱 잘 나타났다. 이러한 결과

Table 5. Comparison of Fire Extinguishing Time with 3% AFFF Solution and Water

Installed Height	Distance from the Nozzle	Fire Unit	Nozzle Type	Extinguishing time (sec)			
				with Water		with AFFF	
				Door Open	Door Close	Door Open	Door Close
4m	0m	1unit	C	108	167	75	153
		2unit		210	112	170	103
3.5m		1unit		Failure	Failure	58	127
		2unit		150	77	60	52
3m		1unit		89	125	63	120
		2unit		Failure	110	208	102

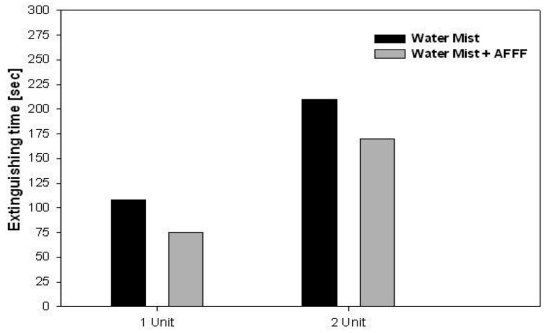

Figure 8. Comparison to fire extinguishing time (Door open).

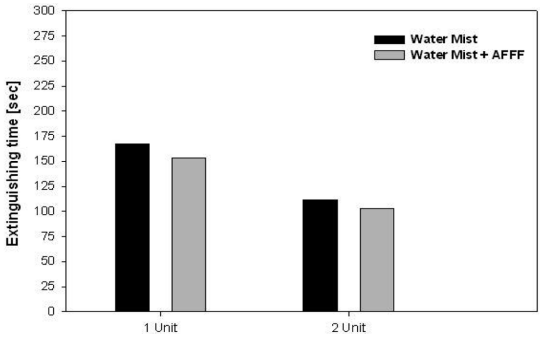

Figure 9. Comparison to fire extinguishing time (Door close).

는 개방공간에서 수성막포가 첨가된 미분무수 소화설비의 소화효과가 저감되는 단점을 보완하고 설비유효성을 증가시키는데 일조할 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 8에 4m 높이에서 방사시 문을 열었을 때 1단위, 2단위 화염에서의 미분무수만을 사용한 경우와 수성막포를 첨가하였을 때의 소화시간을 비교하였다. 소화시간 뿐만 아니라, 실험 중 미분무수만을 사용한 경우에는 화염이 극심한 난류 기동 양상을 보이면서 일부 연료가 연소팬 밖으로 튀어나오는 Splashing 현상과 함께 소화되었으나, 수성막포를 혼합하여 사용한 경우에는 이러한 현상 없이 시간이 지날수록 화염이 작아지면서 유면부터 화염이 사라지듯 소화되는 현상을 보였다.

Figure 9에는 4m 높이 노즐에서 문을 닫고 실험한 경우 1단위, 2단위 화염에서의 소화시간을 비교하였다. 문을 열었을 때보다 수성막포의 첨가에 따른 소화시간의 영향이 상대적으로 적게 나타났다. 즉, 문을 닫았을 때보다 문을 열었을 때 미분무수의 소화성능이 현저히 저감될 때, 수성막포를 첨가함으로서 소화성능이 향상된 것으로 판단되며, 이에 따라 미분무수 소화설비의 한계점을 일정부분 극복할 수 있으리라 판단된다.

4. 결 론

고압 미분무수 노즐을 이용한 n-heptane 화재에 AFFF를 적용하여 소화실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 동일한 크기의 화염에서 미분무수 노즐 중심으로부터 멀어질수록 소화시간이 증가하였는데, 이는 유증기 치환 및 희석에 따라 소화가 이루어지는 소화메커니즘에서 중심으로부터 멀어질수록 미분무수의 방사밀도의 감소로 유증기 치환이 어렵기 때문이다.

둘째, 수성막포 소화약제를 혼합하였을 때, 순수한 물을 사용한 경우보다 소화시간이 감소하였으며, 특히 문이 열린 개방 상태에서는 그 효과가 현저히 나타나, 기 존의 밀폐공간에서만 확인되었던 포소화약제에 의한 소화성능 향상 결과가 일부 개방된 공간에서도 유사하게 나타난 것으로 나타났다. 이는 미분무수의 냉

각 및 희석 효과 외에 포소화약제의 유면 봉쇄 효과에 의한 것으로 판단되며, 포 소화약제 혼합시 개방공간에서 미분무수 소화설비의 한계점을 보완할 수 있는 한 방법으로 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

셋째로는 본 연구에서 미분무수 노즐의 설치높이가 화염면과 가까워질수록 소화시간이 감소하였으나, 노즐 설치높이의 최적화를 위해서는 노즐 높이의 하한치까지의 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 일부 개방된 공간의 존재유무에 따른 소화성능의 현저한 차이는 발생하지 않았으나, 500m^3 이상의 실규모 화재에서의 개방공간 유무에 따른 추가적인 연구도 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. “2007년도 화재통계연감”, 소방방재청(2008).
2. 박재만, “알칼리 금속염을 함유한 미분무수의 소화특성“, 충북대학교 박사학위논문(2005).
3. B. Downie, C. Polymerpoulos and G. Gogos, “Interaction of Water Mist with a Buoyant Force Methane Diffusion Flame”, J. of Fire Safety Vol.24, pp.359-381(1995).
4. G. Holmstedt and P. Andersson, “Limitations of Water Mist as a Total Flooding Agent”, J. of Fire Protection Engineering, Vol.9, No.4, pp.31-50(1999).
5. M.B. Kim and Y.J. Jang, “Water Mist Fire Suppression (1) - a Personal Computer”, J. of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol.13, No.3, pp.27-33(1999).
6. K.D. Lee, “Performance of Fire Extinguishing of Water Mist Nozzle for Power Transformer Fire Scenario”, J. of the Korean Society of Safety, Vol.21, No.6, pp.46-54(2006).
7. NFPA 750, “Standard on Water Mist Fire Protection Systems”, pp.1-14(2007).
8. P. Anderson, G. Holmstedt and M. Arvidson, “Small Scale Experiment and Theoretical Aspects of Flame Extinguishment with Water Mist”, Lund Institute Technology, Report 3080(1996).
9. C. Fu and P.E. Sojka, “Water Mist Impingement onto a Heated Surface”, Proceedings of the 5th ASME/JASME Joint Thermal Engineering Conference, pp.1-5(1999).
10. 한국소방검정공사, “수동식 소화기의 형식승인 및 검정기술기준(KOFEIS 0901)”, 한국소방검정공사(2000).
11. 이경덕, 신창섭, “첨가제가 혼합된 미세물분무의 소화성능에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.16, No.1, pp.1-7(2002).