

첨가제로 아세트산 나트륨-3수화물을 함유한 물 액적의 증발 특성

박재만 · 신창섭[†]

충북대학교 안전공학과

(2004. 2. 27. 접수 / 2004. 6. 3. 채택)

Evaporation Characteristics of a Water Droplet Containing Sodium Acetate Trihydrate as an Additive

Jaeman Park · Changsub Shin[†]

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received February 27, 2004 / Accepted June 3, 2004)

Abstract : The evaporation phenomena of water droplet which has sodium acetate trihydrate($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) as a fire suppression additive were studied. Solutions of sodium salt up to 50% and heated stainless-steel surface were used in the experiment. The evaporation process was recorded using a charge-coupled-device camera at 120 frames per second. The average evaporation rate of the sodium acetate trihydrate solution was lower than that of pure water at a given surface temperature and decreased with the concentration increase due to the precipitation of salt in the liquid film and change of surface tension. The variation of liquid film diameter was measured by time and it was increased by the hot surface temperature increase.

Key Words : droplet, evaporation, water mist, additive

1. 서 론

할론 1301은 탁월한 소화성능에도 불구하고 지구 의 오존층을 파괴하는 환경문제 때문에 몬트리올 의정서에 의거 사용을 금지하고 있는 물질이며 이 에 따라 대체 소화약제의 개발에 대한 연구가 활발 히 진행되고 있는 상황이다.

NIST(National Institute of Standards and Technology : 미국표준기술연구소)의 BFRL(Building and Fire Research Laboratory : 건물화재조사연구소)에서 는 소화약제에 관한 차세대 연구분야로 「Better Use of Water」를 선정하여 물을 기본으로 한 청정소화 약제 개발에 집중투자를 하고 있는데, 기존의 스프 링클러나 일반 물분무 소화설비는 유류화재나 전기 화재, 특히 최근 증가일로에 있는 식용유화재(K급) 에 적용할 수 없을 뿐만 아니라 대량의 물을 사용하 기 때문에 소화 후 물에 의한 2차적 피해가 발생하

는 단점이 있다.

이에 반해, 미세물분무 소화설비는, NFPA 750¹⁾의 정의에 의하면 노즐의 최소설계작동압력에서 방사 되는 물 액적의 $D_{v0.99}$ 가 $1000\mu\text{m}$ 이하인 물분무로 전역 방출가스설비의 특성과 같이 장애물 주위를 움직이면서 소화작용을 한다는 점에서 스프링클러 설비와 소화 메커니즘이 다르다. 또한 물 입자가 작 고 표면적이 크기 때문에 미세물분무는 화염면에서 의 증발특성이 우수하며, 화염 속에 공급된 미세 물 입자는 증발되어 산소의 농도를 감소시키는 질식작용과 화염원의 온도를 저하시키는 냉각작용에 의해 소화작용을 상승시킨다. 그리고 물을 소화약제로 이 용하기 때문에 환경문제에 영향을 주지 않으면서 유독성이 없고, 화재진압에 효과가 크며, 소화 후 물에 의한 2차적 손실이나 위험성이 적거나 없으며 스프링클러설비와는 달리 유류화재나 전기화재에 적용이 가능하다는 것이 특징이다²⁾.

Finnerty 등³⁾은 전두차량에 설치되는 미세물분무 소화시스템의 적용을 위한 실험에서 저온에서의 소화약제의 동결방지가 중요한 사항이며, 이를 해결하

[†]To whom correspondence should be addressed.
csshin@chungbuk.ac.kr

기 위해 특정한 첨가제를 물에 혼합할 경우 동결문제를 해소할 수 있을 뿐만 아니라 화재억제 효과도 증대시킬 수 있다고 보고하였다. 실험에 사용된 13개의 물질 중에서 *potassium lactate*, *potassium acetate*, *sodium bromide* 등이 순수물보다 소화성능이 우수하였다.

Downie 등⁴⁾이 연구한 바에 의하면, 미세물분무의 특성상 노즐로부터 고압으로 방사되지 않을 경우 화염의 플럼에 대한 침투력이 저하되어 물 액적이 화염의 심부까지 도달하지 못하고 화염 주위로 빗겨나가게 되는데, 이는 분사되는 액적의 운동량이 너무 작기 때문이라고 하였다.

화염으로부터 빗겨나간 물 액적은 주위의 가열된 고체 표면에 충돌하게 되고 증발과정을 통하여 간접적으로 소화활동에 관여하게 되는데, 표면을 냉각하여 화염속도를 늦출 뿐만 아니라 증발된 액적이 다시 화염으로 유입되어 화재억제 기능을 수행하므로 주위 가열된 표면에서 액적의 빠른 증발이 요구된다.

또한 첨가제를 함유한 물은 화학적 혹은 물리적인 영향에 의해서 소화효율을 향상시키며, 액적의 증발과 생성과정에도 영향을 끼치는데, 첨가제에 의해서 물의 증기압이 낮아지고 증발을 위한 물질전달을 방해하고 비등점을 상승시키는 등 물의 물리적 특성을 변화시킨다. King 등⁵⁾은 *potassium acetate*와 *sodium iodide*를 함유한 물 액적에 대해서 핵비등 이하 온도영역에서의 증발특성에 관한 실험을 수행한 바 있으며, *potassium acetate*와 *sodium bromide*를 첨가한 물 액적의 자연대류 영역에서의 증발에 관한 연구가 국내에서 보고되기도 하였다⁶⁾.

액적 증발에 관한 최근의 연구로 Crafton과 Black⁷⁾은 가열된 알루미늄과 구리 표면상에서의 물, *n-heptane* 액적의 증발속도 및 열유속을 측정하였으며, 실험결과를 수치해석모델과 비교하였다.

위와 같이 일련의 연구자들의 보고서를 통해서도 알 수 있듯이, 미세물분무의 물리·화학적인 소화성능 향상과 사용상의 단점을 극복하기 위해서 첨가제의 사용이 중요하며, 이러한 첨가제가 소화작용에 주는 영향을 분석하기 위하여 첨가제를 함유한 물 액적의 증발특성에 관한 연구가 우선적으로 수행되어야 한다.

본 연구에서는 첨가제를 함유한 미세물분무의 소화성능을 연구하기 위하여 첨가제의 농도를 변화시켜 증발속도를 측정하고, 증발과정 동안의 액적의

직경변화를 비교하는 등 화재억제제를 함유한 수용액의 증발특성에 대한 분석을 실시하였다. 첨가제로는 화학적인 방법으로 연소시 연쇄반응을 차단하거나 억제하는 *sodium acetate trihydrate*를 사용하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 본 연구에서 사용한 액적 증발 실험장치를 나타내었다. 액적은 syringe pump를 이용하여 0.001mL/s로 생성하였고, needle(28 gauge) 끝에서 액적 자체의 무게에 의하여 분리되어 5cm 직경의 가열된 stainless-steel (SUS 304) 표면에 떨어지게 된다. Steel 표면은 P.I.D controller에 의해서 제어되는 heater로 가열하였으며, 표면으로부터 1.5mm 깊이에 K-type thermocouple를 삽입하여 표면의 온도를 측정하였다.

액적의 증발시간은 초당 120 프레임의 영상을 취득할 수 있는 charge-coupled-device (CCD) 카메라를 사용하였고, 카메라에 부착된 렌즈는 zoom 렌즈를 사용하여 액적 영상을 보다 정밀히 관찰하였다. 조명은 150W의 할로젠 back-light를 사용하였으며, steel 표면을 거울효과를 내기 위해 연마하였기 때문에 광원의 조도보다는 조명과 카메라가 이루는 각도가 영상을 촬영하는데 있어서 중요한 변수로, 본 실험에서는 수평 표면으로부터 카메라가 이루는 각도를 30도로 하였다. 그리고 glass optical fiber로 이루어진 광원을 사용하였기 때문에 조명으로부터 발생하는 열은 미비하여 액적 증발에 영향을 끼치지 않았다.

한편, 본 실험에서는 수용액 중의 물의 겉보기 증발시간을 액적 표면상의 물이 증발하는 시간으로 정의하여 분석하였다.

증발실험은 순수물과 *sodium acetate trihydrate* 수용액에 대해서 실시하였으며 순수물은 증류수를 사용하였고, 수용액은 증류수에 *sodium acetate trihydrate*를 중량비로 10%, 30%, 50% 비율로 용해하여 제조하였다. 미세물분무의 경우 소화시 사용하는 용액의 양이 스프링클러 등에 비하여 아주 적기 때문에 용액의 농도가 높은 경우에도 경제적인 문제를 발생시키지 않는다.

첨가제로 사용한 *sodium acetate trihydrate*는 무색·무취의 결정체로 0°C에서 약 76%의 물에 대한 용해도를 나타내며 120°C 이상으로 가열하면 무수물이 되어 고온에서는 분해한다.

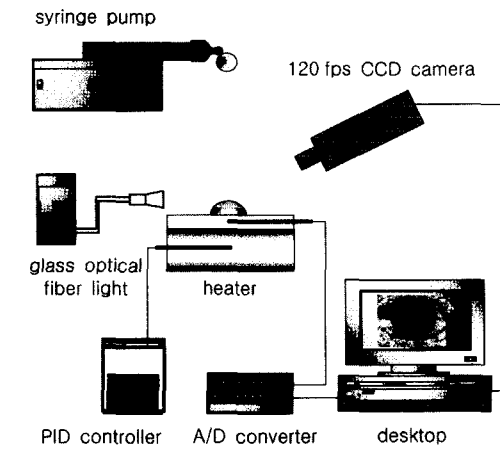


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

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 10mL 용액을 넣은 시험관을 담그고 냉각하여 일정온도에서 유리막대로 휘저어 결정이 석출되었을 때의 온도를 읽되 3회 반복 측정하여 평균값을 응고점으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 첨가제의 농도변화에 의한 액적의 물성

영상처리소프트웨어로 분석한 순수물과 수용액 액적의 초기 직경 평균값은 아래 Table 1과 같으며, 이를 확인하기 위해 각각 100방울을 모아 무게를 측정된 결과 $\pm 3\%$ 이내로 일치하였다. 첨가제에 의해서 밀도, 표면장력 등의 물성이 변화되어 첨가제의 농도가 증가할수록 액적의 초기 직경은 작아졌다. Needle로부터 가열표면까지의 액적 충돌 속도는 0.25m/s이었고 액적의 충돌에너지를 나타내는 We ($We = \rho V^2 D / \sigma$) 수는 2~3으로 충돌로 인해서 액적이 분쇄되지는 않았다.

Table 1에는 실험에 사용된 순수물과 수용액의 물리적 특성치 값과 단일 액적의 무게 및 초기 직경을 측정하여 나타내었다.

용액 액적의 밀도는 50% 농도의 경우 1158.31kg/m³으로 순수물에 비하여 16% 증가하였으며, 이러한 증가는 소화분무시 액적의 운동량을 그만큼 증가시

킬 수 있는 효과가 있고 이에 따라 화염면으로의 액적의 침투를 증가시킬 수 있어 소화효율을 높일 수 있다.

Table 1. Physical properties of the solution.

Fluid	Measured droplet weight (g)	Measured droplet diameter (mm)	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	0.00714	2.40	998.23	0.00089	0.072	0	5.3
10% Na-acetate	0.00735	2.37	1029.23	0.00100	0.076	-8	8.8
30% Na-acetate	0.00739	2.27	1082.48	0.00131	0.076	-16	8.9
50% Na-acetate	0.00746	2.25	1158.31	0.00228	0.075	-16 ^{a)}	9.1

a) not frozen but saturated

수용액의 점도는 순수물에 비하여 12.3%~156% 증가한 것으로 나타났다. 일반적으로 순수물은 유동성 때문에 소화대상물에 오래 부착되어 있지 못하며, 따라서 물의 점도를 증가시킴으로써 유실을 막아 소화효과를 높일 수 있다.

수용액의 표면장력은 순수물에 비하여 4.2%~5.6% 증가한 것으로 나타났다. 소화시 표면장력의 증가는 소화작용에 복합적인 영향을 줄 수 있는데, 일반적으로 표면장력이 저하되면 물의 침투작용을 강화하여 소화효과를 높일 수 있는 것으로 알려져 있다.

용액의 어는점은 농도가 높아질수록 낮아졌으나 50% 수용액의 경우는 -16°C에서 포화되어 더 이상 녹지 않았다. Sodium acetate trihydrate의 물에 대한 용해도는 0°C에서 약 76%이다. 본 실험에서는 순수한 sodium acetate trihydrate 수용액의 어는점을 농도별로 측정하였다.

3.2. 액적 증발 특성

Fig. 2는 가열표면 온도의 함수로써 나타낸 순수물 액적의 증발시간 곡선이다. 증발시간을 측정하기 위해서 액적은 steel 표면에 부드럽게 놓여지며, 20°C 온도간격으로 증발시간을 측정하였다. Bernardin 등⁸⁾이 지정한 바와 같이, 액적의 증발시간을 측정함에 있어서 불확실도는 일련의 반복된 실험을 통하여 감소될 수 있으며, 본 실험에서는 각 온도에서의 증발시간을 세 번 측정하여 이의 평균값을 나타내었다.

액적 직경이 2.4mm 정도인 순수물의 비등영역은 온도별로 구분하면, 100°C 미만에서는 자연대류에

의한 증발이며, 100℃에서 대략 240℃정도까지는 핵비등에 의한 증발, 240℃에서 320℃까지는 천이비등 영역이고, 320℃이상에서는 막비등 현상이 관찰되었다. Leidenfrost 현상은 320℃ 부근에서 목격되었다. 액적의 최소 증발 시간은 핵비등이 끝나는 온도인 240℃ 부근에서 나타났다.

막비등 영역에서는 액적이 표면을 덮지 못하고 과열된 상태로 회전타원체형 물방울을 형성하여 돌아다니게 되며, 이러한 이유로 가열된 고체 표면을 효과적으로 냉각하지 못하게 된다. 따라서 실제로 액적의 증발에 의한 냉각 효과는 핵비등 이하 영역에서 중요한 사항이 되므로 순수물과 수용액에 대해서 핵비등 온도 이하에서의 평균증발속도를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

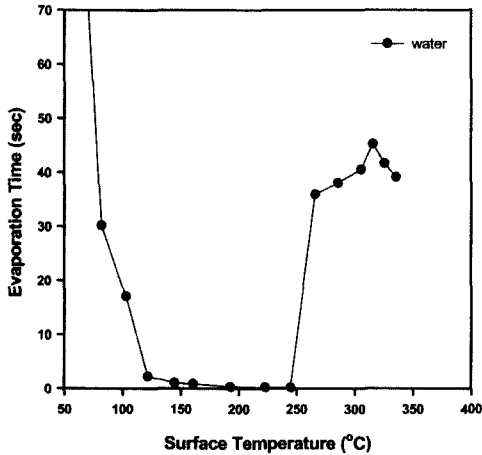


Fig. 2. Evaporation lifetime of water by the temperature.

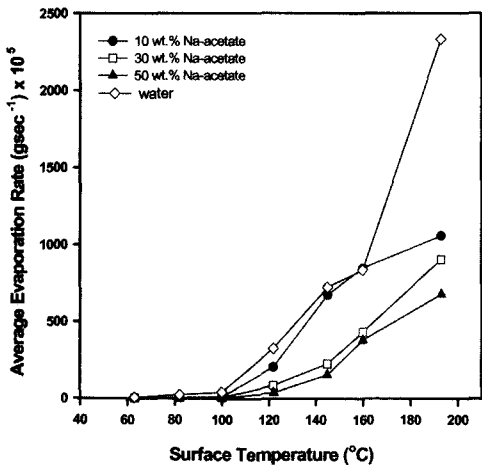


Fig. 3. Average evaporation rates at different temperatures.

각각의 온도에서의 액적의 평균증발속도는 단일 액적 내에 함유된 순수물의 증발을 증발시간으로 나눈 값으로 정의하였다. 수용액의 경우 함유된 물의 절대량이 순수물에 비해서 그 비율만큼 적기 때문에 냉각 효율을 비교하기 위해서는 증발속도를 비교하는 것이 타당하다.

Fig. 3에서 보듯이 자연대류에 의해서 증발이 이루어지는 영역, 100℃ 이하의 온도에서는 순수물과 수용액의 성능을 비교하는 것이 무의미할 정도로 값의 차이가 나지 않는다. 그러나 핵비등 영역인 100℃에서 200℃ 부근에서는 순수물과 수용액의 증발속도가 많은 차이를 나타냄을 알 수 있다.

물에 첨가되는 sodium acetate의 함량이 많아질수록 순수물에 비해서 증발속도가 느려지는 것을 알 수 있는데, 이것은 두 가지 이유로 설명될 수 있다. 첫째는 수용액에 용해되어 있는 용질들이 증발에 의해 표면으로 석출되고 이로 인해 액적 내부로의 열 및 물질전달을 방해하는 인자로 작용하기 때문이며, 둘째는 Fig. 4에 나타냈듯이 순수물의 경우 가열 표면으로의 액적 부착시 수용액 액적에 비해 넓게 퍼짐으로써 접촉면적이 증대되어 액적 내부로의 열전달이 원활하게 이루어지기 때문이다. 그러나 핵비등이 시작되는 온도인 100℃ 이후 영역에서는 접촉면적에 의한 이유보다는 물질전달로 증발속도의 증가이유를 설명하는 것이 적절한데, 수용액의 경우 농도가 증가할수록 비등점이 상승하게 되고 이로 인해 동일 온도에서 포화증기압이 감소되므로 액적 밖으로 방출되는 수증기의 양이 줄어들게 된다.

또한 순수물의 경우 핵비등이 시작되는 100℃부터 증발속도가 증가하여 200℃에서 크게 증가하고 있으며 이러한 현상은 막비등 영역으로 들어가기 전까지 나타나고 있다. 그러나 이에 반하여 수용액

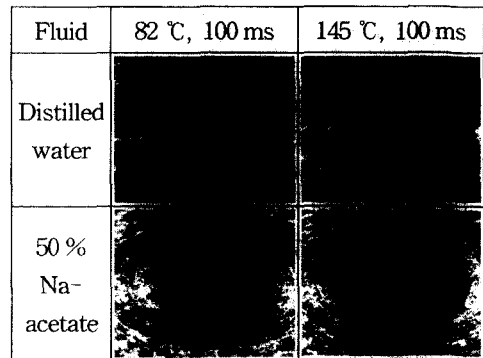


Fig. 4. Evaporation phenomena of water and solution droplets.

의 증발속도는 점진적으로 증가하였는데, 이는 온도가 높은 만큼 더 빨리 첨가제의 석출이 이루어져 열 저항으로 작용하는 이유에서이다.

Fig. 4에 표면온도 82℃, 122℃의 동일시간에서의 액적의 모양을 비교하여 나타내었다. 순수물의 표면 장력이 수용액보다 낮아 액적이 수용액에 비해 더 넓게 퍼지는 것을 볼 수 있으며, 또한 액적내 기포의 생성도 원활함을 알 수 있다.

3.3. 액적 직경의 변화

Bernardin 등⁹⁾은 액적에 의해서 표면 냉각이 이루어지는 부분을 결정하기 위해서는, 화염 주위의 가열된 표면에 부착하는 액적의 시간에 따른 직경 변화를 분석하는 것이 필요하다고 하였다.

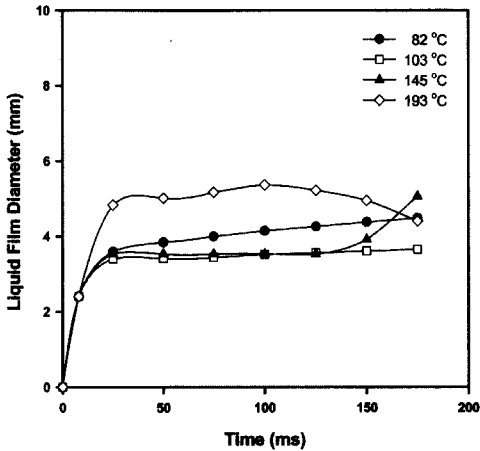


Fig. 5. Change of liquid film diameter by time for water.

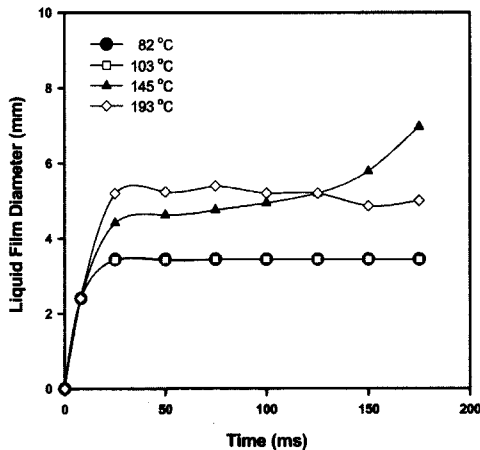


Fig. 6. Change of liquid film diameter by time for 10% sodium acetate trihydrate.

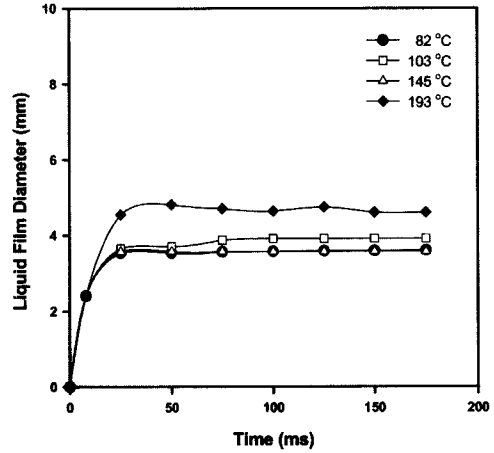


Fig. 7. Change of liquid film diameter by time for 30% sodium acetate trihydrate.

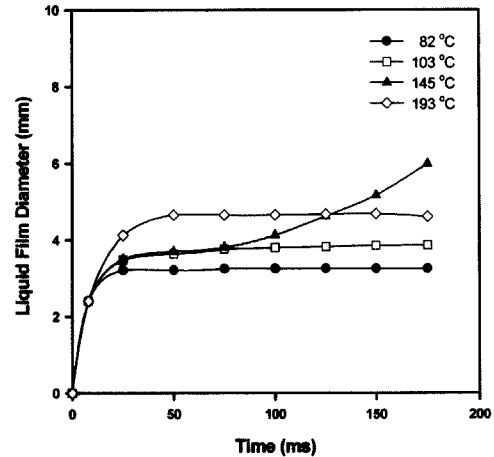


Fig. 8. Change of liquid film diameter by time for 50% sodium acetate trihydrate.

Fig. 5, 6, 7, 8에는 각각 순수물과 10%, 30%, 50% sodium acetate trihydrate 수용액의 증발영역별 액적의 직경을 측정하여 그 변화를 나타내었다. Steel 표면에 액적이 부착되기 전의 시간인 0ms에서는 액적의 직경을 0mm로 보았으며, 액적이 부착된 순간 이후 매 8ms (1/120 frame)마다의 영상을 분석하여 직경을 측정하였다. 이때 가열 steel 표면의 온도는 자연대류에 의한 증발이 일어나는 82℃, 비등이 시작되는 103℃, 핵비등 영역인 145℃, 핵비등이 종결되는 지점인 193℃이었으며 액막 직경의 변화는 표면의 온도에 의존함을 알 수 있다.

자연대류 영역과 비등이 시작되는 온도에서의 액적의 직경변화는 일정 시점까지 균일한 성장을 나

타낸 다음 안정된 형태를 띄고 있으며 이러한 안정 추세는 100ms 부근까지 계속 되었다. 이 경우 가열 판의 온도가 높을수록 액적의 직경이 크게 나타났으며, 이러한 현상은 액적내에서 발생하는 증기 기포가 온도가 높을수록 양이 많아지고 또한 온도가 높을수록 표면장력도 낮아져 직경이 더 큰 액막을 형성하는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 온도에 따

른 영향 중 순수물의 경우 낮은 온도에서 핵비등 영역에 비해 직경이 더 큰 액막을 형성하는 경우도 일부 나타나고 있으며 이러한 것은 빠른 증발에 의해서 액적이 순간적으로 응축하기 때문이며, 이외에도 표면장력, 기포발생량, 밀도, 점도 등이 복합적으로 작용하여 액막의 크기를 결정하게 되므로 이 과정에서 복합적인 물질특성에 의해 나타나는 현상으로

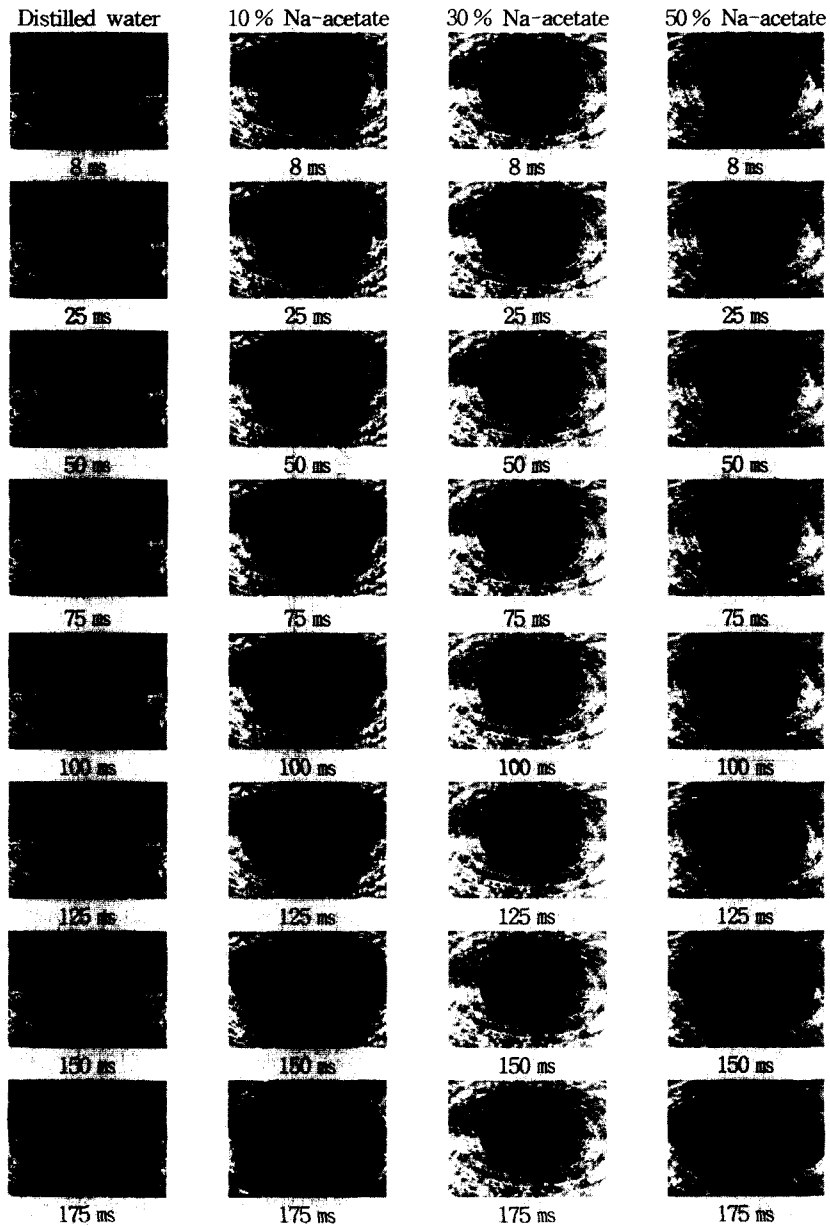


Fig. 9. Evaporation phenomena of water and sodium solutions on the hot surface at 145 °C.

이해할 수 있다. 모든 실험과정에서 증발실험은 액적의 충돌에너지를 무시할 수 있는 $We=2$ 내지 3 정도에서 수행하였다.

액적의 직경변화는 100ms 이후에도 안정된 형태를 유지하고 있으나 가열판의 온도가 145℃인 경우는 다른 온도와는 아주 다른 형태의 거동이 나타나고 있다. 30%의 경우를 제외하고 순수물과 sodium acetate trihydrate 수용액 모두에서 100ms 이후에 액막 직경이 크게 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. 이 경우 193℃의 경우보다도 훨씬 큰 직경을 나타내고 있으며 이러한 형상은 액적내에서 발생하는 수증기의 기포가 이 온도에서 아주 균일하게 형성되어 액막을 가장 크게 부풀어오르게 하는 데에 비하여 더 높은 온도인 193℃에서는 더 많은 기포가 발생되지만 기포의 합체 등 불균일한 기포발생이 이루어져 액막의 직경이 오히려 작아지는 현상이 나타난 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 9는 액적의 직경을 측정할 시점에서의 순수물과 수용액 액적의 증발 모습을 담은 영상으로 이때 가열 표면의 온도는 핵비등 영역인 145℃였다.

화재진압과 관련하여 이러한 첨가제를 함유한 액적 증발 특성에 관한 연구는 King 등⁵⁾의 결론처럼, 노즐로부터 분사된 액적의 대부분이 화염을 뚫고 화염의 심부까지 침투한다면 첨가된 염은 화학적 소화활동에 이용될 수 있으며, 염에 의한 액적의 증발속도의 감소는 소화 효율에 있어서 영향을 주지 않는다. 그러나 미세물분무와 같이 크기가 미세하여 운동량이 적은 액적의 경우는 방사된 물 액적 중에서 많은 양이 화염을 뚫지 못하고 주위로 빗겨나갈 수 있으며 이에 따라 고온표면에서의 액적의 증발 특성이 소화 효율을 결정하는 주요 지배인자가 될 수 있다.

액적의 물성에서 살펴본 바와 같이 액적의 밀도는 sodium acetate trihydrate 50% 농도의 경우 순수물에 비하여 16% 증가하였으며, 이러한 증가는 소화분무시 화학적 소화제인 sodium acetate trihydrate에 의한 화학적 소화효과와 함께 액적의 운동량을 그만큼 증가시켜 소화효율을 높일 수 있는 효과가 있으나, 또한 첨가제의 증가에 따라 액적의 증발속도가 느려져 소화효율을 낮출 수 있는 반대의 영향을 줄 수 있다. 따라서 미세물분무 시스템에 첨가제를 함유한 용액을 적용할 경우 이와 같은 복합적인 영향을 고려하여 소화시스템을 설계하여야 한다.

4. 결 론

본 연구는 첨가제를 함유한 미세물분무의 소화성을 분석하기 위한 단계별 연구의 일환으로 첨가제로써 화재억제제를 함유한 수용액의 증발특성에 대한 분석을 실시하였다.

첨가제로는 sodium acetate trihydrate를 50%까지 농도별로 사용하였으며 첨가제의 농도가 높아질수록 액적의 증발속도는 느리게 나타났다. 순수물과 수용액의 증발특성을 비교한 결과 핵비등 영역에서 온도가 높을수록 용해된 첨가제의 석출 및 표면장력의 변화 등 물리적 영향으로 순수물에 비해 수용액의 증발속도가 현저히 느리게 나타났다.

시간에 따른 액적의 직경변화는 온도가 높을수록 액적내에서 발생하는 수증기의 기포가 많아지고 표면장력이 낮아져 액적 낙하 후 100ms까지는 가열판의 온도가 높을수록 액적의 직경이 크게 나타났다. 그러나 100ms 이후에는 액적내의 기포형성형태의 변화로 가열판의 온도가 145℃인 경우 시간이 지남에 따라 액적의 직경이 크게 증가하였다.

미세물분무 소화설비의 첨가제로써 sodium acetate trihydrate를 적용할 경우 sodium 염에 의한 화학적 소화효과, 액적 밀도의 증가에 의한 운동량 증가 효과 등과 함께 증발속도의 감소에 의한 역효과를 감안하여 sodium acetate trihydrate의 농도를 조절하여야 한다.

참고문헌

- 1) "NFPA 750 : Standard on Water Mist Fire Protection Systems", National Fire Protection Association, 2003.
- 2) 이경덕, "저압식 미세물분무 시스템의 소화성능 최적화와 첨가제의 영향", 충북대학교 박사학위논문, 2002.
- 3) A.E. Finnerty, R.L. McGill, W.A. Slack "Water-based halon replacement sprays", ART-TR-1138, U.S. Army Research Lab., 1996.
- 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) 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.
- 6) 방창훈, “단일액적에 의한 증발냉각”, 경북대학교 박사학위논문, 2000.
 - 7) E.F. Crafton, W.Z. Black, “Heat transfer and evaporation rates of small liquid droplets on heated horizontal surfaces”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol 47, pp. 1187~1200, 2004.
 - 8) J.D. Bernardin, I. Mudawar, “The Leidenfrost point : experimental study and assessment of existing models”, Trans. ASME J. Heat Transfer, 121, pp. 894~903, 1999.
 - 9) J.D. Bernardin, C.J. Stebbins, I. Mudawar, “Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, pp. 247~267, 1997a.