

영상분석에 의한 첨가제-물 액적의 증발 특성

박재만 · 신창섭

충북대학교 안전공학과

1. 서 론

미세물분무시스템을 사용한 화재진압시 물에 첨가제를 넣는 경우 화학적 혹은 물리적인 작용에 의해서 소화효율을 향상시킬 수 있다. 첨가제에 의해서 물의 증기압이 낮아지고 증발을 위한 물질전달을 방해하며 비등점을 상승시키는 등 물의 물리적 특성을 변화시키게 되며 이에 액적의 증발과 생성과정에도 영향을 끼친다.

Finnerty 등¹⁾은 전투차량에 설치되는 미세물분무 소화시스템의 적용을 위한 실험에서 동결방지를 위해 특정한 첨가제를 물에 혼합할 경우 동결문제를 해소할 수 있을 뿐만 아니라 화재억제 효과도 증대시킬 수 있다고 보고하였다. 그리고 King 등²⁾은 potassium acetate와 sodium iodide를 함유한 물 액적에 대해서 핵비등 이하 온도영역에서의 증발특성에 관한 실험을 수행하여 이들의 소화작용 증진효과에 대하여 발표하였다.

본 연구는 첨가제를 함유한 미세물분무의 소화성능을 연구하기 위한 기초자료로 첨가제의 농도를 변화시켜 각각의 물리적 특성을 측정하였으며, 액적의 증발속도를 측정하여 화재억제제를 함유한 수용액의 증발특성에 대한 분석을 실시하였다. 첨가제로는 화학적인 방법으로 연소시 연쇄반응을 차단하거나 억제하는 기능을 가진 sodium acetate trihydrate를 사용하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 본 연구에서 사용한 액적 증발 실험장치를 나타내었다. 액적은 syringe pump를 이용하여 0.001 ml/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, zoom 렌즈를 사용하여 액적 영상을 보다 정밀히 관찰하였다. 조명은 150 W의 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 조명으로 부터 발생하는 열은 미비하여 액적 증발에 영향을 끼치지 않았다.

증발실험은 순수물과 sodium acetate trihydrate 수용액에 대해서 실시하였으며 순수물은 증류수를 사용하였고, 수용액은 증류수에 sodium acetate trihydrate를 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. 본 실험에서는 수용액 중의 물의 겉보기 증발시간을 액적 표면상의 물이 증발하는 시간으로 정의하여 분석하였다.

첨가제로 사용한 sodium acetate trihydrate는 무색·무취의 결정체로 0℃에서 약 76%의 물에 대한 용해도를 나타내며 120℃ 이상으로 가열하면 무수물이 되어 고온에서는 분해한다.

표면장력은 Du Nouüy 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.

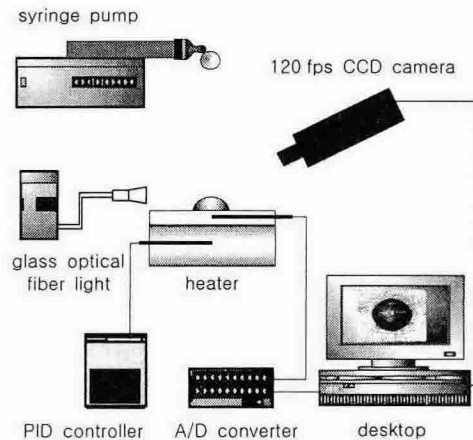


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

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 100 방울을 모아 무게를 측정한 결과 $\pm 3\%$ 이내로 일치하였다. 첨가제에 의해서 밀도, 표면장력 등의 물성이 변화되어 첨가제의 농

도가 증가할수록 액적의 초기 직경은 작아졌다. Needle로부터 가열표면까지의 액적 충돌 속도는 0.25 m/s 이었고 액적의 충돌에너지를 나타내는 We ($We = \rho V^2 D / \sigma$) 수는 2~3 으로 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 kg/m^3 으로 순수물에 비하여 16% 증가하였으며, 이러한 증가는 소화분무시 액적의 운동량을 그만큼 증가시킬 수 있는 효과가 있고 이에 따라 화염면으로의 액적의 침투를 증가시킬 수 있어 소화효율을 높일 수 있다.

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 있다.

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

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

3.2. 액적 증발 특성

Fig. 2는 가열표면 온도에 따른 순수물 액적의 증발시간 곡선이다. 증발시간을 측정하기 위해서 액적은 steel 표면에 부드럽게 놓여지며, 20°C 온도간격으로 증발시간을 측정하였다. 액적 직경이 2.4 mm 정도인 순수물의 비등영역을 온도별로 구분하면, 100°C 미

만에서는 자연대류에 의한 증발이며, 100 °C에서 240 °C까지는 핵비등에 의한 증발, 240 °C에서 320 °C까지는 천이비등영역이고, 320 °C이상에서는 막비등 현상이 관찰되었다. Leidenfrost 현상은 320 °C 부근에서 목격되었다. 액적의 최소 증발 시간은 핵비등이 끝나는 온도인 240 °C 부근에서 나타났다.

막비등 영역에서는 액적이 표면을 덮지 못하고 과열된 상태로 회전타원체형 물방울을 형성하여 돌아다니게 되며, 이러한 이유로 가열된 고체 표면을 효과적으로 냉각하지 못하게 된다. Fig. 3에 순수물과 수용액에 대해서 핵비등 온도 이하에서의 평균증발속도를 비교하여 나타내었다.

수용액의 경우 함유된 물의 절대량이 순수물에 비해서 그 비율만큼 적기 때문에 냉각 효율을 비교하기 위해서는 증발속도를 비교하여야 하며, 본 실험에서는 각각의 온도에서의 액적의 평균증발속도는 단일 액적 내에 함유된 순수물의 증량을 증발시간으로 나눈 값으로 정의하였다. Fig. 3에서 보듯이 자연대류에 의해서 증발이 이루어지는 영역, 100 °C 이하의 온도에서는 순수물과 수용액의 값의 차이가 나지 않는다. 그러나 핵비등 영역인 100 °C에서 200 °C 부근에서는 순수물과 수용액의 증발속도가 많은 차이를 나타낼 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 °C이후 영역에서는 접촉면적에 의한 이유보다는 물질전달로 증발속도의 증가 이유를 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 °C부터 증발속도가 증가하여 200 °C에서 크게 증가하고 있으며 이러한 현상은 막비등 영역으로 들어가기 전까지 나타나고 있다. 그러나 이에 반하여 수용액의 증발속도는 완만한 증가를 나타내었는데, 이는 온도가 높은 만큼 더 빨리 첨가제의 석출이 이루어져 열저항으로 작용하는 이유에서이다.

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

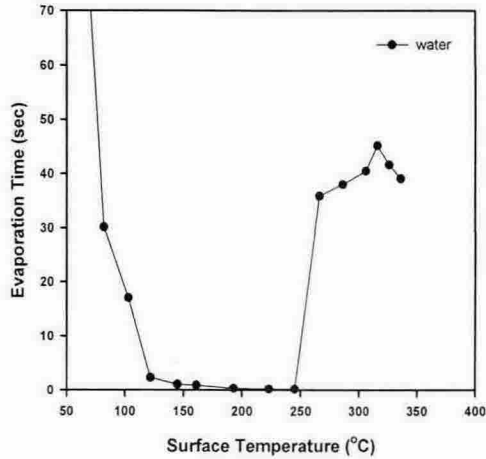


Fig. 2. Evaporation lifetime of water by the temperature.

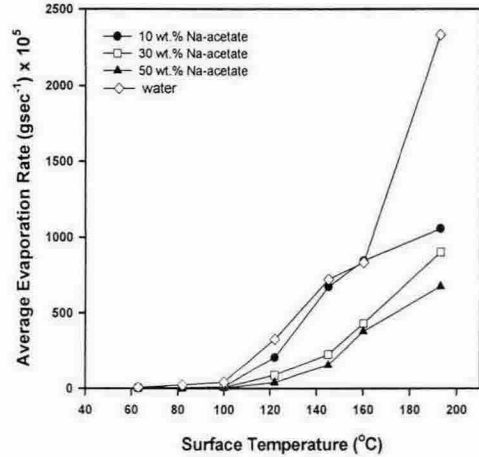


Fig. 3. Average evaporation rates at different temperatures.

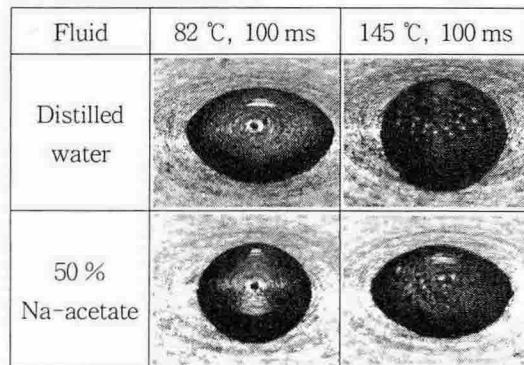


Fig. 4. Evaporation phenomena of water and solution droplets.

4. 결론

본 연구는 첨가제를 함유한 미세물분무의 소화성능을 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.

미세물분무 소화설비의 첨가제로써 sodium acetate trihydrate를 적용할 경우 sodium

염에 의한 화학적 소화효과, 액적 밀도의 증가에 의한 운동량 증가효과 등과 함께 증발 속도의 감소에 의한 역효과를 감안하여 첨가제의 농도를 조절하여야 한다.

참고문헌

- 1) A.E. Finnerty, R.L. McGill, W.A. Slack "Water-based halon replacement sprays", *ART-TR-1138*, U.S. Army Research Lab., 1996.
- 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) 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.
- 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) 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.
- 6) "NFPA 750 : Standard on Water Mist Fire Protection Systems", National Fire Protection Association, 2003.