

화제억제제가 첨가된 수용액 액적의 증발냉각 현상

유 갑 중^{*}, 방 창 훈^{*}, 김 현 우^{*}
경북대학교 기계공학과, *경북전문대학 소방안전관리과

Evaporation Cooling Phenomena of Droplets Containing Fire Suppression Agents

Kap-Jong Riu[†], Chang-Hoon Bang^{*}, Hyun-Woo Kim^{*}

Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
^{*}Department of Fire Protection Engineering, Kyungpuk college, Yeongju 750-712, Korea

(Received July 20, 2001; revision received August 17, 2001)

ABSTRACT: Evaporation cooling phenomena of droplets containing fire suppression agents on a hot metal surface were experimentally investigated. Solutions of water containing potassium acetate (30~50% by weight) and sodium bromide (10~30% by weight) were used in the experiments, and surface temperatures were ranged from 70~116°C. The evaporation time of the droplet on the heated surface was determined by using frame-by-frame analysis of the video records. It is found that the apparent evaporation time is shorter in turns of pure water, sodium bromide solution and potassium acetate solution. However, the time averaged heat flux is higher in turns of pure water, sodium bromide solution and potassium acetate solution. In-depth temperature variation of the hot metal does not occur significantly by the kinds of additive.

Key words: Evaporation cooling(증발냉각), Droplet(액적), Fire suppression agent(화제억제제), Apparent evaporation time(겉보기 증발시간)

기 호 설 명

하첨자

C_p : 비열 [J/kg°C]

d_o : 액적의 초기직경 [mm]

q : 시간평균 열유속 [kW/m²]

T : 온도 [°C]

t : 시간 [s]

l : 액적

t : 총증발기간

∞ : 외기조건

1. 서 론

분무를 이용하여 열을 제어하는 분야는 산업 전반에 걸쳐 다양하게 이용되어 왔다. 특히 강제의 열처리과정에 가장 널리 사용되어 왔다.⁽¹⁾ 또한 소화방법으로 가장 널리 사용되는 방식이다.

물은 가격이 저렴하고 변질의 우려가 없으며, 인체에 무해하여 소화제로 가장 적합하다. 그러나 물은 전기화재에 부적합하며, 특히 0°C 이하에서 동결하여 배관을 동파시키거나 소화시 다량

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m³]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-53-950-5571; fax: +82-53-957-4994

E-mail address: kjriu@knu.ac.kr

의 물사용으로 2차 재해를 유발시키는 단점을 가지고 있다. 이에 따라 소화제로서의 물의 단점을 보완하고 소화성능을 향상시키려는 연구가 활발히 이루어지고 있다.^(2,3,4)

DiMarzo et al.⁽⁵⁾은 고체 표면온도에 따른 액적의 증발시간, 증발체적, 열유속 등을 실험과 수치해석적 방법으로 연구하였다. Xiong et al.⁽⁶⁾은 고온의 스테인레스 표면에서 순수물 액적과 다양한 탄화수소계 화합물 액적들의 증발현상에 관하여 연구하였다. Abu-Zaid et al.⁽⁷⁾은 다공질 및 비다공질 세라믹 표면에 놓인 단일 물 액적의 증발생각을 실험적으로 연구하였으며, 증발시간은 동일 실험조건하에서 비다공질 고체가 다공질 고체보다 길게 나타났다. 반면 액적이 영향을 미치는 영역은 다공질 고체가 더욱 크다는 것을 밝혔다. Tartarini et al.⁽⁸⁾은 고체 표면에 부착된 액적의 증발생각을 수치해석적으로 연구하였다. 그들은 액체영역에 대해서 검사체적법(CVM)을 적용하고 고체영역에 대해서는 경계요소법(BEM)을 사용하여 열전도 방정식을 풀었다. Riu et al.⁽⁹⁾은 금속 및 고분자물질 표면에 부착된 단일 물 액적에 의한 증발생각을 연구하였다.

상기의 연구들은 액적 및 고체 표면의 종류에 따른 액적의 증발특성에 관한 연구가 대부분이며, 물에 첨가제를 첨가하여 소화능력을 향상시키려는 연구는 미흡한 편이다.

최근 발표된 연구에 따르면, 물에 첨가되는 일

부 약품의 경우 소규모의 화재를 소화하기 위하여 분무될 경우 순수한 물보다 더욱 효과적임이 증명되었다.⁽¹⁰⁾ 즉, 화재억제제를 물에 첨가하여 분무할 경우 첨가제의 화학적 소화효과에 의하여 화염의 연소반응이 억제되어 소화에 유리하기 때문이다. 그러나 분무된 수용액 액적이 화염에 직접적으로 노출되지 않은 저온영역에서의 액적증발에 따른 첨가제의 효과는 분명하지 않으며 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 화재가 전파되지 않은 저온영역에서 첨가제가 포함된 수용액 액적의 증발생각 현상을 구명하려 하였다.

기존의 결과⁽¹¹⁾를 참고로 하여 첨가제로는 K-acetate와 NaBr를 사용하였으며, 각각의 경우에 우수한 소화효과를 나타낸 농도를 기준으로 하여 K-acetate의 경우 30%에서 50%까지, NaBr의 경우 10%에서 30%까지를 실험범위로 정하였다. 또한 실험을 통하여 수용액 액적의 증발시간, 접촉각, 고체의 내부온도 등을 가시화 방법과 열전대를 이용하여 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 액적의 증발생각을 위한 전체 실험장치를 개략적으로 나타낸 그림이다.

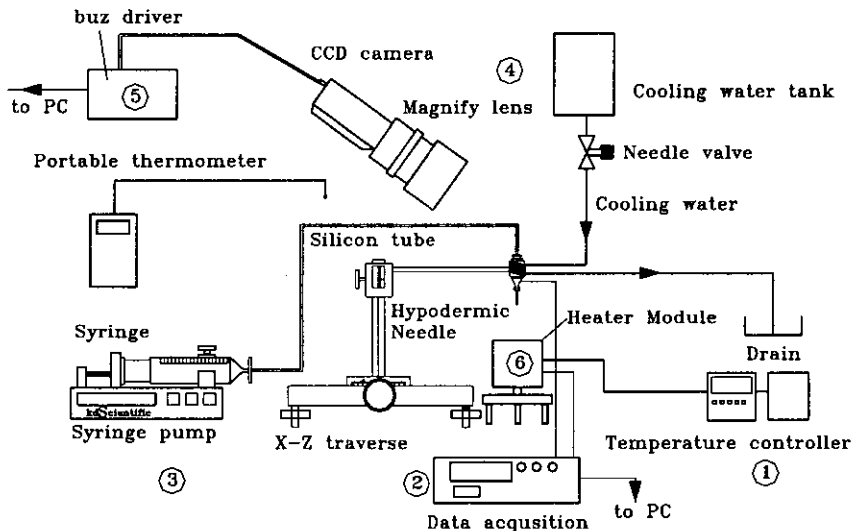


Fig. 1 Schematic diagram of overall apparatus of droplet evaporation experiment.

전원공급부 ①은 가열모듈 하부에 부착된 열전대의 온도를 이용하여 제어하는 온도제어기(Fuji, pxw-9)와 여기에서 출력되는 전류에 의해 구동되는 전원공급기(Spc-101series)로 구성되어 있다. 데이터처리부 ②는 가열모듈에 부착된 5개 및 액적발생기에 부착된 1개의 K형 열전대($\phi = 0.1 \text{ mm}$)의 데이터를 처리하기 위한 데이터처리장치(Fluke, 2640A)로 구성되어 있다.

유량공급부 ③은 액적의 속도 및 크기를 조절하기 위한 정유량 조절기(KD scientific model 100)와 일정 온도의 액적을 발생시키는 액적발생기 및 액적의 직경을 조절하기 위한 니들과 소형 X-Z Traverse로 구성되어 있다. 냉각수제어부 ④는 액적발생기의 온도를 제어하기 위한 냉각수 탱크와 유량조절밸브, 액적발생기를 냉각시키기 위한 열교환기로 구성되어 있다.

영상처리부 ⑤는 영상처리를 위해서 고 해상도 CCD 카메라와 CCD 카메라에서 얻은 영상을 처리하기 위한 영상 처리장치로 구성되어 있다. 영상처리용 CCD 카메라에는 확대 렌즈를 부착하였다. 그리고 가열 블록 케이스 ⑥은 외부 치수가 $140 \times 140 \times 100 \text{ mm}$ 이다.

Fig. 2는 가열고체의 형상과 열전대의 위치와 가열체의 기하학적 형상을 나타낸 그림이다. 전체 길이를 70 mm로 목(neck)부분 직경이 8 mm, 하부 직경이 25 mm인 원통형으로 제작하였다. 열전대는 가열고체의 표면에서 깊이 1.5 mm, 7 mm, 9.5 mm, 12 mm 및 14.5 mm에 각각 5개 부

착하였으며, 온도제어용 열전대는 깊이 68 mm에 1개 설치하였다. 가열고체를 가열하기 위한 히터는 240 V, 200 W인 밴드형을 사용하였다. 가열고체인 황동, 탄소강 표면은 #2000 사포로 연마한 후에 $10 \mu\text{m}$ 의 크롬을 도금하였다.

2.2 실험방법 및 실험범위

주위의 온도는 $25.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 설정하였고, 액적의 온도도 주위온도와 동일하게 유지시켰다. 또한 액적의 증발기간 동안 가열체의 온도변화를 열전대를 통하여 측정하고, 시간에 따른 액적의 변화는 CCD 카메라를 이용하여 기록하였다. 가열체의 열전도도에 따른 영향을 조사하기 위하여 황동, 탄소강을 사용하였으며, 초기 표면온도는 $70 \sim 116^\circ\text{C}$ 범위에서 실험하였다. 액적의 직경은 2.6 mm로 하였다.

액적의 열 물성치는 Cengel⁽¹²⁾의 자료를 이용하였다. 실험에 사용한 순수 물은 증류수를 100°C 까지 가열하여 물 속의 용존가스를 제거한 후 사용하였다.

Table 1에 액적실험의 변수와 범위를 요약하여 나타내었다.

수용액의 경우 점도계와 표면장력계를 사용하여 측정된 물성치를 Table 2에 나타내었다.

Kline⁽¹⁴⁾의 식에 의하여 계산된 불확실도는 다

Table 1 Parameter and experimental ranges for droplet experiment

Surrounding & initial droplet temperature	$25 \pm 0.5^\circ\text{C}$
Surface temperature	$70^\circ\text{C} \sim 116^\circ\text{C}$
Surface material	Brass and Carbon steel
Droplet diameter	2.6 mm

Table 2 Physical properties of the solutions

Fluid	Viscosity [g/cm · s]	Surface tension [dyne/cm]
K-acetate (30%)	0.0220	73.0
K-acetate (40%)	0.0291	71.3
K-acetate (50%)	0.0384	69.7
NaBr (10%)	0.0098	73.7
NaBr (20%)	0.0102	75.0
NaBr (30%)	0.0109	76.0

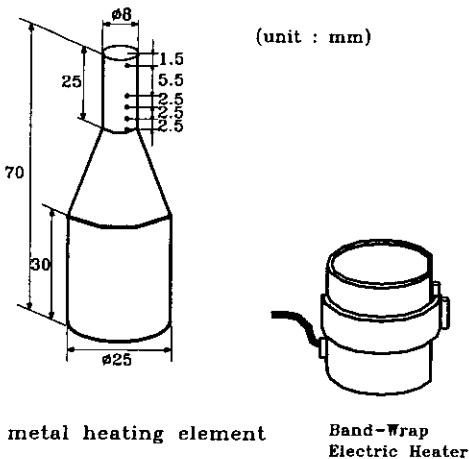


Fig. 2 Schematic diagram of a heating element and a band-wrap electric heater.

음과 같다. 온도의 불확실도는 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 이고, 제어되는 히터의 온도는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이다. 길이의 측정에 대한 불확실도는 $\pm 0.25\text{ mm}$ 정도이고, 농도의 불확실도는 $\pm 0.01\%$ 이다. 시간의 불확실도는 CCD 카메라의 기본측정시간인 $1/30\text{ s}$ 이고, 최대오차는 0.17% 로 나타났다. 화상데이터의 불확실도는 $\pm 7\ \mu\text{m}$ 로 나타났다. 또한 온도와 증발시부터 계산된 증발 열유속은 최대 $\pm 9\%$ 로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 첨가제 종류에 따른 냉각특성

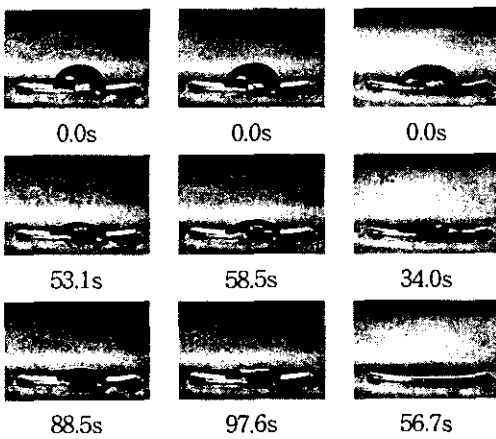
Fig. 3은 가열고체의 재질이 탄소강, 가열고체 표면의 초기온도가 94.4°C , 액적 직경이 2.6 mm 일 때, 수용액과 순수 물에 따른 액적의 증발현상을 시간에 따라 초당 30프레임으로 촬영한 사진 중의 일부이다. 또한 사진촬영시 액적증발기간 동안의 고체의 내부온도, 액적의 접촉각, 형상비를 측정하였다.

증발시간이 NaBr 수용액의 경우 88.5초, K-acetate 수용액은 97.6초, 순수 물은 56.7초이며, K-acetate 수용액의 증발시간이 가장 길게 나타났다. 수용액들의 증발시간이 순수 물의 경우보다 긴 이유는 수용액의 포화증기압이 순수 물보

다는 작고, 수용액의 첨가제 성분이 액적 내부의 증발을 억제하기 때문이다. 또한 NaBr 수용액 액적의 증발시간이 K-acetate 수용액의 경우보다 작게 나타났다. 이는 Na^+ 이온이 K-acetate 수용액의 K^+ 이온보다 물과의 결합력이 작기 때문에 쉽게 증발할 수 있기 때문으로 사료된다.

Fig. 4는 가열고체 표면의 초기온도가 86.4°C , 액적 직경이 2.6 mm 이고 가열고체의 재질이 탄소강일 때, 수용액(30%, w/w)과 순수 물에 대하여 액적부착 후 경과시간에 따른 온도변화를 나타낸 그림이다. 온도측정 위치는 액적이 부착된 고체 표면의 중심점에서 깊이 방향으로 1.5 mm , 7.0 mm 이다.

수용액의 경우 고체 내부의 온도는 액적이 부착시 급격히 하강한 후, 일정기간 거의 변화가 없다가 시간이 지남에 따라 조금씩 증가하며 가열고체 표면의 초기온도로 회복된다. 순수 물의 경우 고체 내부의 온도는 액적부착 초기 수용액보다 조금 더 하강한 후, 지속적으로 감소하여 최소값에 도달한 후 증가하여 초기온도로 회복하게 된다. 첨가제의 종류에 따른 특성은 거의 나타나고 있지 않으나, 순수 물의 경우 수용액보다 증발비로 30% 더 많은 물을 포함하고 있어서 고체 표면에서의 냉각이 다소 많이 일어난다. 따라서 고체 내부의 온도하강이 조금 더 일어난다.



(a) NaBr (b) K-acetate (c) Pure water
Fig. 3 Evaporation of droplets of NaBr, K-acetate solutions (30%, w/w) and water on steel (initial surface temperature: 94.4°C , droplet diameter: 2.6 mm).

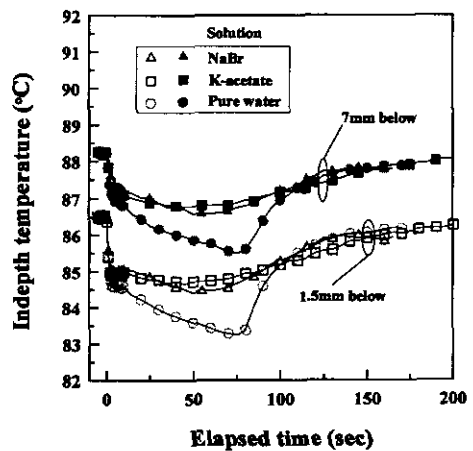
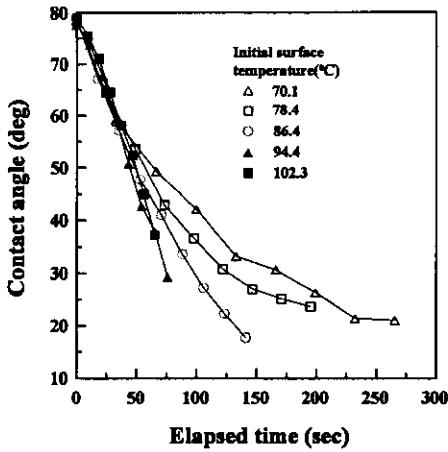
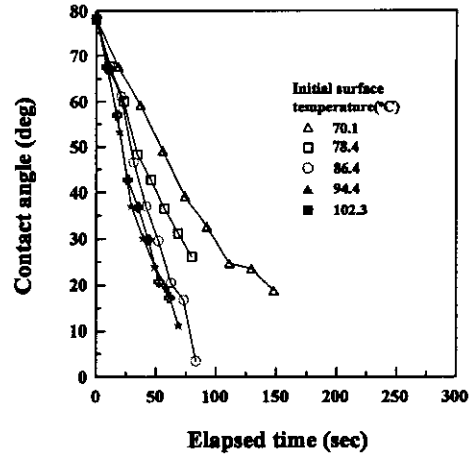


Fig. 4 In-depth temperature variation of a steel versus elapsed time for K-acetate, NaBr solutions (30%, w/w) and water (initial surface temperature: 86.4°C , droplet diameter: 2.6 mm).



(a) K-acetate solution



(b) NaBr solution

Fig. 5 Contact angle with elapsed time on steel at various initial surface temperatures with K-acetate, NaBr solutions (30%, w/w) (droplet diameter: 2.6 mm).

Fig. 5는 액적 직경이 2.6 mm이고 가열고체의 재질이 탄소강이며 가열고체 표면의 초기온도가 70.1~102.3℃일 때, 경과시간에 따른 액적의 접촉각 변화를 나타낸 그림이다. 여기서 접촉각은 고체-액체-기체 접촉점에서 액체 표면에 접선을 그을 때, 접선과 고체 사이의 각도로 정의하였다.⁽¹³⁾

Fig. 5(a)는 K-acetate 수용액일 때를 나타낸 그림으로, 시간이 지남에 따라 액적의 접촉각이 감소하고 있다. 그리고 액적의 증발기간 말기에 접촉각 변화를 나타내지 못한 것은 액적 내의 수분이 거의 증발하고 용질이 석출되기 때문에 접촉각을 구할 수 없었다. 가열고체 표면의 초기온도가 증가함에 따라 접촉각은 액적부착 초기에는 거의 차이가 없으나 50초 이후에는 가열고체 표면의 초기온도가 낮을수록 접촉각이 크게 나타난다. 이는 가열고체 표면의 초기온도가 높을수록 액적의 표면장력이 작아져서 나타나는 현상이다. 또한 가열고체 표면의 초기온도가 94.4℃ 이상에서는 용질의 석출이 매우 급격히 발생하기 때문에 총증발기간이 약 80% 범위에서만 접촉각을 측정할 수 있었다. Fig. 5(b)는 NaBr 수용액일 때를 나타낸 그림이다. NaBr의 접촉각 변화는 K-acetate 수용액의 접촉각 변화와 비교하여 더 급격하게 일어난다.

이는 K-acetate 수용액보다 증발이 빨리 일어나기 때문에 접촉각 변화가 시간에 따라 급격히

변화한다.

Fig. 6는 액적 직경이 2.6 mm이고 가열고체의 재질이 탄소강일 때, 수용액(30%, w/w)과 순수 물에 대하여 가열고체 표면의 초기온도에 따른 증발기간 동안의 시간 평균 열유속(q)을 나타낸 그림이다.

시간 평균 열유속(q)⁽³⁾은 증발기간 동안 고체와 평균 열유속으로 식(1)과 같다.

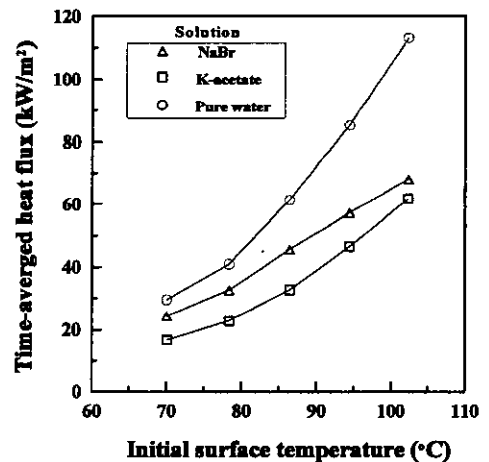


Fig. 6 Time-averaged heat flux versus initial surface temperature on steel for K-acetate, NaBr solutions (30%, w/w) and water (droplet diameter: 2.6 mm).

$$q = (2 d_o \rho_l \lambda') / (3 t_i) \tag{1}$$

$$\lambda' = \lambda + C_p (T_i - T_\infty)$$

식(1)에서 λ' 는 현열을 고려한 유효증발잠열을, λ 는 단순히 증발잠열만을, T_i 는 액적의 시간 평균 온도⁽³⁾를 나타낸다.

가열고체 표면의 초기온도가 증가함에 따라 평균 열유속은 증가하며, 평균 열유속은 순수 물, NaBr 수용액, K-acetate 수용액의 순으로 크게 나타난다.

동일 가열고체 표면의 초기온도에서 수용액의 평균 열유속이 순수 물의 경우보다 작게 나타난다. 이는 수용액에 포함된 첨가제의 영향으로 경계면에서 고체에서 액적으로의 열유속이 작게 되기 때문이다. 또한 가열고체 표면의 초기온도가 낮은 영역에서는 순수 물과 수용액과의 열유속 차가 작게 나타나지만 온도가 상승할수록 차는 증가하고 있다. 이는 가열고체 표면의 초기온도가 높은 영역에서는 수용액의 경우가 액적부착 초기 증발이 급격히 일어남에 따라 다량의 첨가제가 석출되고 이것이 고체와 액적의 계면에서의 열저항으로 작용하여 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 7은 가열고체의 재질이 탄소강일 때, 수용액(30%, w/w)과 순수 물에 대하여 가열고체 표면의 초기온도에 대한 겉보기 증발시간을 나타낸 그림이다.

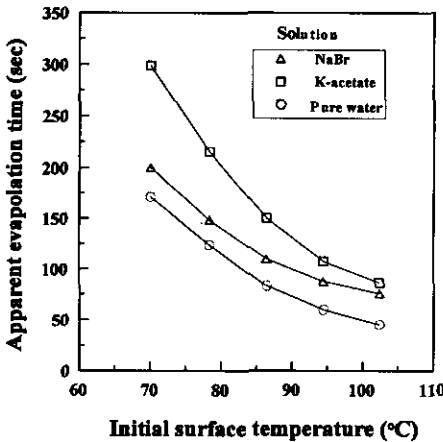


Fig. 7 Apparent evaporation time versus initial surface temperature on steel for K-acetate, NaBr solutions (30%, w/w) and water (droplet diameter: 2.6 mm).

여기에서 겉보기 증발시간은 촬영된 영상자료로부터 액적이 고체 표면에 부착된 시점에서 수분이 완전히 증발하여 물의 흔적이 완전히 없어지는 상태까지의 기간으로 정의하였다.⁽¹⁰⁾ 전반적으로 가열고체 표면의 초기온도가 증가할수록 겉보기 증발시간이 감소하고 있으며,⁽¹⁰⁾ 증발시간은 K-acetate 수용액, NaBr 수용액, 순수 물의 순으로 길게 나타난다. 이러한 성향은 King⁽¹⁰⁾의 결과와 일치한다. 가열고체 표면의 초기온도가 증가할수록 겉보기 증발시간이 감소하는 것은 고체 표면의 온도가 증가함에 따라 고체면에서 액적으로의 열전달이 증가하기 때문이다.

본 연구의 관심사인 화재가 전파되지 않은 저온영역에 위치한 고체 표면의 냉각효과 측면에서는 순수 물의 경우가 수용액보다 우수한 것으로 나타났으나, 실제 화재실험에서는 K-acetate 수용액이 순수 물보다 우수한 소화능력을 나타내었다.⁽¹¹⁾ 따라서 첨가제의 화학적 소화효과를 포함하여 이에 대한 보다 자세한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

3.2 첨가제 농도에 따른 냉각특성

Fig. 8은 액적 직경이 2.6 mm, 가열고체 표면의 초기온도는 75°C, 가열고체의 재질이 황동이고, K-acetate 수용액 농도가 0%(순수 물), 30%, 40%, 50%일 때, 경과시간에 따른 접촉각 변화를

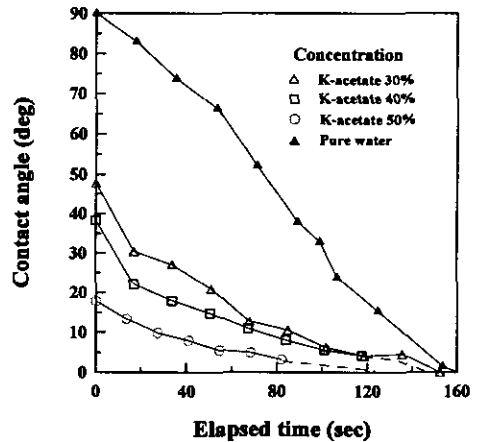


Fig. 8 Contact angle with elapsed time on brass for K-acetate solutions (30~50%, w/w) and water (initial surface temperature: 75°C, droplet diameter: 2.6 mm).

나타낸 그림이다. 시간이 경과함에 따라 접촉각은 서서히 감소하며, 순수 물일 경우 초기접촉각은 거의 90°에 가깝게 나타나지만 K-acetate 수용액의 농도가 30%에서 50%로 증가함에 따라 접촉각이 47°에서 18°로 급격히 감소하고 있다. 이는 첨가제의 농도에 따라 수용액의 표면장력이 감소하여 나타나는 현상으로 생각된다. 또한 접촉각이 증발 초기에 비교적 작게 나타나며 이에 따라 접촉면적이 증가하여 초기증발이 원활히 일어난다. 이는 사진촬영 결과에서도 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 가열고체의 재질이 황동이며, NaBr 수용액 농도가 0%(순수물), 10%, 20%, 30%일 때, 경과시간에 따른 접촉각 변화를 나타낸 그림이다.

시간이 지남에 따라 접촉각은 서서히 감소하며, K-acetate 수용액보다 큰 접촉각을 나타낸다. 또한 NaBr 수용액의 농도가 10%에서 30%로 증가함에 따라 74°에서 45°로 급격히 감소하고 있다. 또한 NaBr 수용액의 경우 접촉각이 비교적 크기 때문에 액적부착 초기에 증발이 비교적 작게 일어나서 용질의 석출이 늦게 일어나며 이에 따라 동일농도에서 결보기 증발시간도 K-acetate 수용액보다 조금 더 짧게 나타난다.

Fig. 10은 가열고체의 재질이 황동이고 K-acetate 수용액의 농도가 0%, 30%, 40%, 50%일 때, 가열고체 표면의 초기온도에 따른 결보기 증발시간을 나타낸 그림이다.

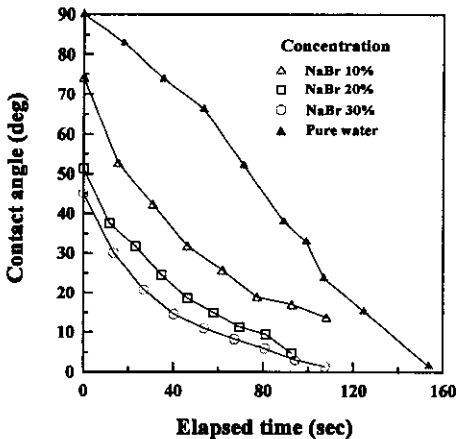


Fig. 9 Contact angle with elapsed time on brass for NaBr solutions (10~30%, w/w) and water (initial surface temperature: 75°C, droplet diameter: 2.6 mm).

가열고체 표면의 초기온도가 증가할수록 결보기 증발시간은 감소하고 있다. K-acetate 수용액의 농도가 30%, 40%에서는 증발시간이 거의 차이가 없으나, 수용액의 농도가 50%인 경우에는 차이가 많이 난다. 이는 수용액 액적에 포함된 수분의 양이 절대적으로 작아서 결보기 증발시간이 짧게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 11은 가열고체의 재질이 황동이고 NaBr 수용액의 농도가 0%, 10%, 20%, 30%일 때, 가열

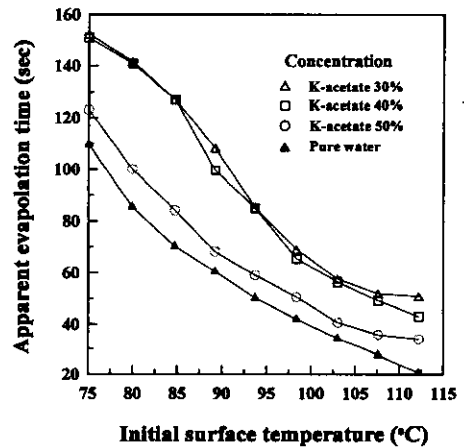


Fig. 10 Apparent evaporation time with initial surface temperature on brass for K-acetate solutions (30~50%, w/w) and water (droplet diameter: 2.6 mm).

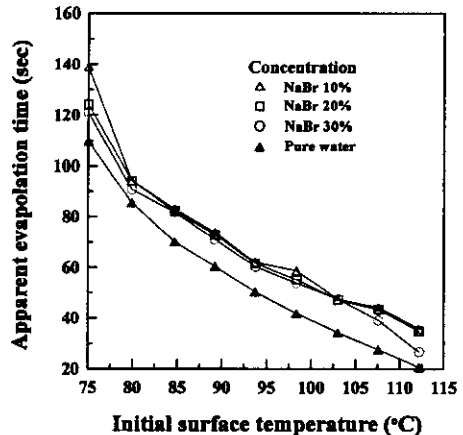


Fig. 11 Apparent evaporation time with initial surface temperature on brass for NaBr solutions (10~30%, w/w) and water (droplet diameter: 2.6 mm).

고체 표면의 초기온도에 따른 걸보기 증발시간을 나타낸 그림이다.

가열고체 표면의 초기온도가 증가할수록 걸보기 증발시간은 감소하고 있으며, 이러한 성향은 Fig. 3에 나타난 것과 같다. 그러나 NaBr 수용액의 농도가 증가하여도 걸보기 증발시간은 현저한 차이가 없다. 그러므로 화재가 전파되지 않은 저온영역에서는, NaBr 수용액의 경우 농도를 10% 정도로 낮게 하여 동일 액적 체적내 물의 절대량 증가시킴으로써 고체 표면의 냉각효과를 향상시키는 것이 유리할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 화재억제제가 액적의 증발냉각에 미치는 영향을 구명하기 위하여, 실제의 화재 실험에서 우수한 성능을 나타낸 화재억제제 K-acetate(30~50%), NaBr(10~30%)를 사용하였다. 액적의 직경은 2.6 mm로 하였으며, 가열고체 재질로는 금속의 경우 황동, 탄소강을 사용하여 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 걸보기 증발시간은 순수 물, NaBr 수용액, K-acetate 수용액 순으로 짧게 나타난다. 또한 평균 열유속은 순수 물, NaBr 수용액, K-acetate 수용액 순으로 높게 나타난다. 미연소면에서의 액적의 걸보기 증발냉각만 고려한 경우 순수물을 사용하는 것이 유리하다.

(2) 가열면 초기온도의 증가는 액적의 표면장력을 감소시켜 접촉각이 작게 나타나며, 동일한 표면온도에서 표면장력이 상대적으로 큰 NaBr 수용액의 접촉각이 K-acetate 수용액보다 크게 나타났다. 또한 첨가제의 종류에 따른 내부의 온도변화는 거의 나타나지 않았다.

(3) 걸보기 증발시간은 NaBr 수용액의 경우, 농도에 따른 차이가 거의 나타나지 않았다. 또한 K-acetate 수용액의 경우 농도 30%와 40%에서는 차이가 거의 나타나지 않으나, 농도가 50%에서 차이가 많이 발생하였다.

참고문헌

- Kim, Y. C., Riu, K. J. and Seo, T. W., 2000, Measurements of Heat Transfer Distribution in Spray Cooling of Hot Steel Plate, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 10, pp. 886-893.
- Michiyoshi, I. and Makino, K., 1978, Heat Transfer Characteristics of Evaporation of a Liquid Droplet on the Heated Surfaces, Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 605-613.
- Bonacina, C., DelGiudice, S. and Comini, G., 1979, Dropwise Evaporation, J. of Heat Transfer, Vol. 101, pp. 441-446.
- Grissom, W. M. and Wierum, F. A., 1981, Liquid Spray Cooling of a Heated Surface, Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 24, pp. 261-271.
- DiMarzo, M. and Evans, D. D., 1989, Evaporation of a Water Droplet Deposited on a Hot High Thermal Conductivity Surface, J. of Heat Transfer, Vol. 111, pp. 210-213.
- Xiong, T. Y. and Yuen, M. C., 1991, Evaporation of a Liquid Droplet on a Hot Plate, Int. J. Heat Transfer, Vol. 34, No. 7, pp. 1881-1894.
- Abu-Zaid, M. and Atreya, A., 1994, Transient Cooling of Hot Porous and Nonporous Ceramic Solids by Droplet Evaporation, J. of Heat Transfer, Vol. 116, pp. 694-701.
- Tartarini, P. and DiMarzo, M., 1994, Dropwise Evaporative Cooling in Radiative Field, Experimental Heat Transfer, Vol. 6, pp. 102-108.
- Riu, K. J., Bang, C. H. and Kim, J. S., 2001, Evaporation Cooling of Single Droplet on a Heated Solid Surface, KSME(B), Vol. 25, No. 6, pp. 845-852.
- King, M. D., Yang, J. C., Chien, W. S. and Grosshandler, W. L., 1997, Evaporation of a Small Water Droplet Containing an Additive, Proc. of the ASME National Heat Transfer Conference, Baltimore.
- Finnerty, A. E., McGill R. L. and Slack, W. A., 1996, Water-Based Halon Replacement Sprays, ART-TR-1138, U.S. Army Research Lab., Aberdeen Proving Ground.

12. Cengel, Y. A. and Boles, M. A., 1994, Thermodynamics, McGraw-Hill, Int.
13. Carey, V. P., 1992, Liquid-Vapor Phase Change Phenomena, Hemisphere.
14. Kline, S. and McClintok, F. A., 1953, describing Uncertainties in single sample Experiments, Mechanical Engineering.