

NaBr을 첨가한 물소화제의 냉각효과에 관한 연구 A Study on the Cooling Effect of a Water Fire Extinguishing Agent Containing NaBr

방창훈[†] · 김종석*

Bang, Chang Hoon[†] · Kim, Jong Seok*

경북전문대학 소방안전관리과

*경일대학교 안전공학과

(2001. 02. 21 접수/2001. 03. 09 채택)

요 약

본 연구의 목적은 NaBr(30%, w/w)을 첨가한 물소화제의 냉각효과를 연구하는 것이다. 고온체로는 탄소강과 테프론을 사용하였다. 실험에서 고온체 표면의 온도범위는 70°C~116°C이며 액적의 크기는 2.6 mm이다. 실험결과 고온체 내부의 온도는 재질에 관계없이 순수한 물의 경우가 NaBr 수용액보다 낮게 나타났으며, 테프론의 경우가 탄소강보다 온도 변화가 크게 나타났다. 또한 재질에 관계없이, 평균 열 유속은 순수한 물의 경우가 NaBr 수용액 보다 크게 나타났으며, 걸보기 증발시간은 순수한 물의 경우가 NaBr 수용액보다 짧게 나타났다.

ABSTRACT

The objective of the present work is to examine the cooling effect of a water fire extinguishing agent containing NaBr(30%, w/w). The carbon steel and teflon were used as a hot solid. The temperature on the hot solid surface ranged from 70°C to 116°C and water droplet size was 2.6 mm in the experiments. It is suggested that regardless of the hot solid material, the in-depth temperature of the case of NaBr solution is lower than that of pure water and the variation of in-depth temperature of teflon is higher than that of carbon steel. Regardless of the hot solid material, the time averaged heat flux of the case of pure water is higher than that of NaBr solution. the apparent evaporation time of the case of pure water is shorter than that of NaBr solution.

Keywords : NaBr, Water fire extinguishing agent, Droplet

1. 서 론

최근 물소화제의 소화성능을 향상시키고 단점을 보완하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{1,3)}

물소화제의 소화성능을 향상시키기 위한 여러 가지 방법중 소화제로 사용되는 물에 첨가제를 첨가하여 소화 능력을 향상시키려는 연구가 선진 각 국에서 수행되고 있으며 이에 관한 연구는 다음과 같다.

King 등⁴⁾은 순수한 물과 potassium acetate, sodium iodide 수용액의 상호성능을 비교실험하였으며 증발시간에 관한 수학적 모델을 제시하였다. Qiao 등⁵⁾

은 고온 표면위에서의 SDS(sodium dodecyl sulfate)를 첨가한 수용액과 순수한물과의 열전달 특성에 관한 연구를 수행하였다. Tinker 등⁶⁾은 첨가제가 액적의 증발시간에 큰 영향을 미치며, 고온 표면의 종류에 따라라도 증발시간의 차이가 발생함을 보고하였다.

최근 발표된 연구에 따르면 물에 첨가되는 일부 약품의 경우 소규모의 Jet Fuel Pool Fire를 소화하기 위하여 분무될 경우 순수한 물보다 더욱 효과적임이 증명되었다.⁷⁾ 그러나 분무된 액적이 화염에 직접적으로 노출되지 않은 미연소 고온체 표면위에서 첨가제가 첨가된 물소화제의 냉각효과는 분명하지 않으며 이에 대한 연구는 현재까지 매우 미흡하다.

따라서 본 연구에서는 고온체 표면에서 첨가제가 용

[†] E-mail: bch@mail.kbc.ac.kr

해된 물소화제의 냉각 효과를 규명하려 한다. 기존의 결과⁷⁾를 참고로 하여 첨가제로는 NaBr를 사용하였으며, 농도는 30%로 정하였다. 또한 순수한 물과 NaBr이 용해된 수용액의 냉각효과를 비교실험 하였으며, 각각의 실험을 통하여 증발시간, 고온체의 내부온도, 평균 열유속 등을 가시화 방법과 열전대를 이용하여 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 전체 실험 장치를 개략적으로 나타낸 그림이다.

전원 공급부 ①은 가열 모듈 하부에 부착된 열전대의 온도를 통해 고온체의 온도를 제어하는 온도 제어기(Fuji, pxw-9)와 이 제어기로부터 출력되는 전류에 의해 구동되는 전원 공급기(Spc-101series)로 구성되어 있다.

데이터 처리부 ②는 가열 모듈에 부착된 5 개 와 액적 발생기에 부착된 1개의 K형 열전대($\Phi=0.1$ mm)의 데이터를 처리하기 위한 데이터 처리장치(Fluke, 2640A)로 이루어져 있다. 유량 공급부 ③은 액적의 속도 및 크기를 조절하기 위한 정유량 조정기(KD scientific model 100)와 일정 온도의 액적을 발생시키

는 액적 발생기 및 액적의 직경을 조절하기 위한 니들과 소형 X-Z Traverse가 설치되었으며, 냉각수 제어부 ④는 액적 발생기의 온도를 제어하기 위한 냉각수 탱크와 유량 조절 밸브, 액적 발생기를 냉각시키기 위한 열 교환기로 구성되어 있다.

영상 처리부 ⑤는 증발입자의 가시화를 위해서 고해상도 CCD 카메라와 CCD 카메라에서 얻은 영상을 처리하기 위한 영상 처리장치로 이루어져 있다. 영상 처리용 CCD카메라에는 확대 렌즈를 부착하였다. 가열 블록 케이스⑥은 외부 치수가 $140 \times 140 \times 100$ mm이다.

Fig. 2는 고온체의 형상과 열전대의 위치 및 히터의 기하학적 형상을 나타낸 그림이다.

고온체는 사용된 재질에 따라 형상을 다르게 만들었으며, 그림(a)에서 금속의 경우 1차원적인 열전달 해석이 가능하기 때문에 전체 길이가 70 mm, 목(neck)부분 직경이 8 mm, 하부 직경이 25 mm인 원통형으로 제작하였다. 열전대는 고온체 표면의 중심축으로부터 깊이방향으로 각각 1.5 mm, 7 mm, 9.5 mm, 12 mm, 14.5 mm에 5개를 부착하였으며 온도 제어용 열전대는 길이 68 mm에 설치하였다. 고온체를 가열하기 위한 히

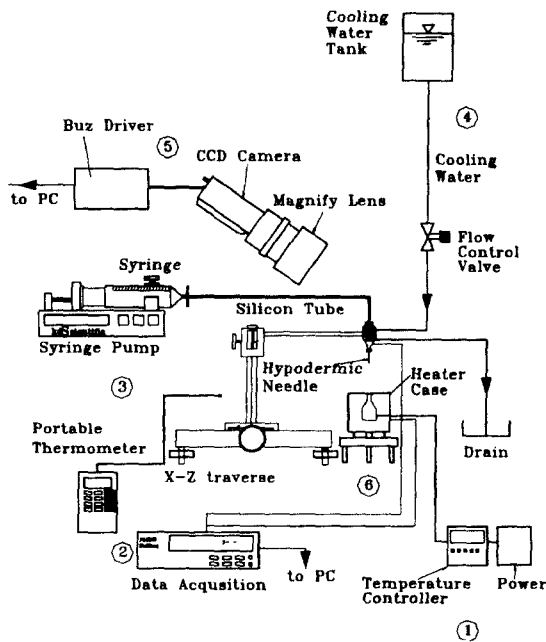


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

(unit : mm)

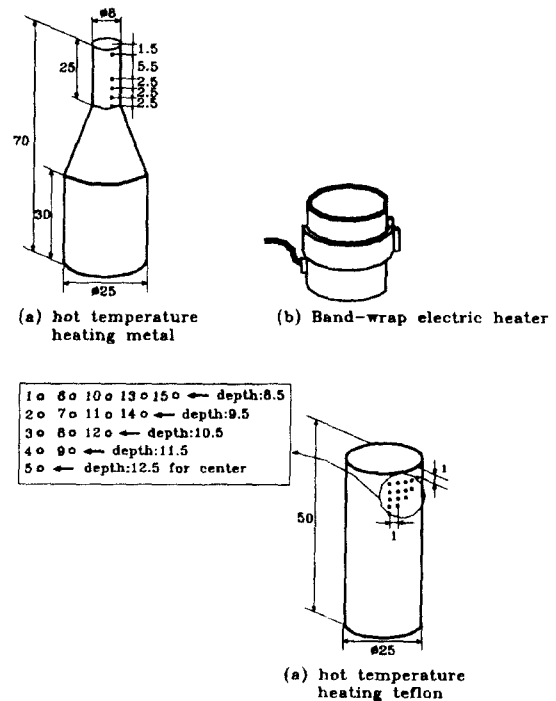


Fig. 2. Schematic diagram of hot temperature heating metal, band-wrap electric heater and hot temperature heating teflon.

Table 1. Experimental condition

Surrounding & initial droplet temperature	Surrounding: $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ Initial droplet: $25 \pm 0.25^\circ\text{C}$
Surface temperature range	$70^\circ\text{C} \sim 116^\circ\text{C}$
Surface material	Carbon steel, Teflon
Droplet diameter	2.6 mm(0.0153 g)

터는 240 V, 200 W인 밴드형을 사용하였다. 고분자 물질로 사용된 테프론은 열전도도가 낮기 때문에 축대칭의 2차원 열전도를 고려하여 그림(c)과 같이 전체 길이가 50 mm이고 직경이 25 mm인 원통형으로 하였다. 열전대는 고온체 표면의 중심축 방향으로 1 mm 간격으로 5개를 부착하고, 중심축에서 반경 방향으로 1 mm 떨어진 곳에서 깊이 방향으로 4개를 부착하고, 여기서 1 mm 떨어진 곳에 깊이 방향으로 3개를, 다시 1 mm 떨어진 곳에 깊이 방향으로 2개를 다시 1 mm 떨어진 곳에 1개를 십여 총 15개를 부착하였다. 급속 고온체의 표면은 #2000 사포로 연마한 후에 $10 \mu\text{m}$ 의 크롬을 도금하였다.

2.2 실험 방법

주위의 온도는 $25.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 설정하였고, 액적의 온도는 $25.5 \pm 0.25^\circ\text{C}$ 로 하였다. 증발시 고온체 표면에서 물이 완전히 증발할 때까지를 증발시간으로 하였다. 또한 실험하는 동안 온도 변화를 열전대를 통하여 측정하고, 액적의 크기 감소는 CCD카메라를 이용하여 기록하였다.

열전도도에 따른 영향을 조사하기 위하여 탄소강과 테프론을 사용하였으며, 표면 온도범위는 $70^\circ\text{C} \sim 116^\circ\text{C}$ 이다. 액적의 직경은 2.6 mm로 하였다.

액적의 열 물성치는 Cengel의 자료⁸⁾를 이용하였다. 실험에 사용한 순수한 물은 증류수를 100°C 까지 가열하여 물 속의 기체를 제거한 후 사용하였다. Table 1에 액적 증발실험의 변수와 범위를 요약하여 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 고온체의 재질이 탄소강이고, 고온체 표면의 초기 온도가 94.4°C 이며 액적 직경이 2.6 mm일 때, NaBr 수용액과 순수한 물의 액적의 증발 현상을 시간에 따라 초당 30프레임으로 촬영한 사진중의 일부이다.

또한 사진 촬영시 액적 증발 기간 동안의 고온체의 내부온도를 측정하였다.

증발시간이 NaBr 수용액의 경우 88.5초, 순수한 물

의 경우 56.7초이다. NaBr 수용액의 증발시간이 순수한 물보다 증발시간이 긴 것은 NaBr 수용액의 포화증기압이 순수한 물보다는 작고, NaBr 수용액의 용질이 액적 내부의 증발을 억제하기 때문이다.

Fig. 4는 고온체 표면의 초기 온도가 86.4°C 이고 액

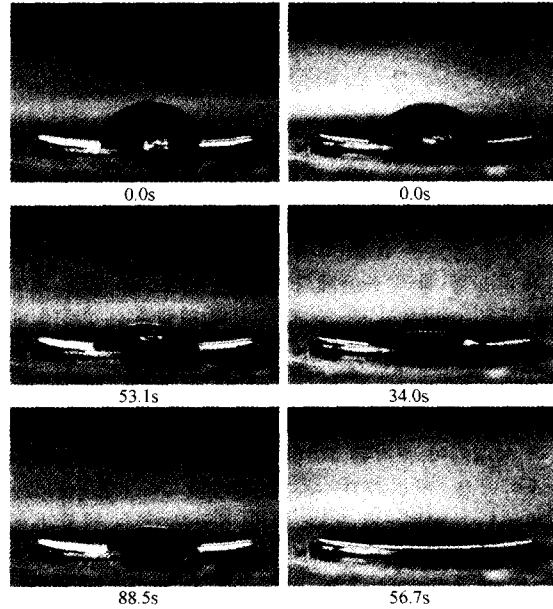


Fig. 3. Photograph of droplet evaporation a) NaBr solution b) pure water on carbon steel ($T_{s,0} = 94.4^\circ\text{C}$, $d_0 = 2.6 \text{ mm}$).

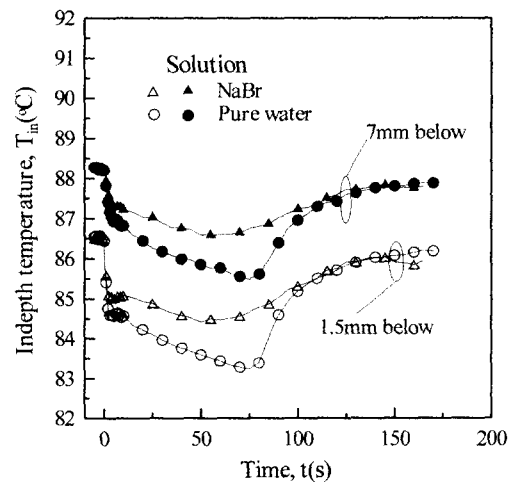


Fig. 4. The variation of in-depth temperature of carbon steel for NaBr solution(30%, w/w) and water according to time elapse($T_{s,0} = 86.4^\circ\text{C}$, $d_0 = 2.6 \text{ mm}$).

적 직경이 2.6 mm이며 고온체의 재질이 탄소강일 때, NaBr 수용액(30%, w/w)과 순수한 물에 대하여 액적 부착후 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 그림이다. 온도 측정 위치는 액적이 부착된 고온체 표면의 중심점에서 깊이 방향으로 1.5 mm, 7.0 mm이다.

전체적인 온도분포는 고온체와 액적의 초기 접촉에 의한 급속감소대와 이후 액적의 점차적인 증발에 의한 완만감소대 그리고 초기온도로 회복하는 지수적 증가대로 구분할 수 있다.

NaBr 수용액의 경우 고온체 내부의 온도는 액적이 부착시 급격히 하강한 후 시간이 지남에 따라 완만히 감소하며 이후 온도는 상승하여 고온체 표면의 초기

온도로 회복된다. 순수한 물의 경우 고온체 내부의 온도는 액적 부착 초기 NaBr 수용액보다 조금 더 하강한 후, 지속적으로 감소하여 최소 값에 도달한 후 증가하여 초기 온도로 회복하게 된다. 순수한 물의 경우 NaBr 수용액보다 증량비로 30% 더 많은 물을 포함하고 있어서 고온체 표면에서의 냉각이 다소 많이 일어난다.

Fig. 5는 고온체 표면의 초기 온도가 86.9°C이고 액적 직경이 2.6 mm이며 고온체의 재질이 테프론일 때, NaBr 수용액(30%, w/w)과 순수한 물에 대하여 시간에 따른 테프론 내부의 온도 변화를 나타낸 그림이다.

Fig. 5(a)는 고온체 표면의 중심점에서 깊이 방향으로 1.0 mm, 2.0 mm 아래의 온도 변화를 나타낸 그림이다.

전반적으로 액적이 부착된 후 테프론 내부의 온도는 급격히 하강한 후 최소 값에 도달하며, 이후 초기 온도로 회복한다. 또한 순수한 물의 경우에는 온도하강 후 일정기간 온도 변화가 없는 구간이 다소 길게 나타나며, 금속 표면인 경우의 Fig. 4와 비교하면 테프론의 경우 열전도도가 작기 때문에 내부의 온도하강은 더 크게 일어난다.

Fig. 5(b)는 액적이 부착된 고온체 표면의 중심점의 1.0 mm 깊이에서 반경 방향인 r=0 mm, 1.0 mm의 위치에서 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 그림이다.

액적 부착후 고온체 내부의 온도는 급격히 하강한 후 최소 값에 도달하며, 이후 초기 온도로 회복한다. 또한 액적중심(r=0 mm)에서의 온도하강이 액적의 중

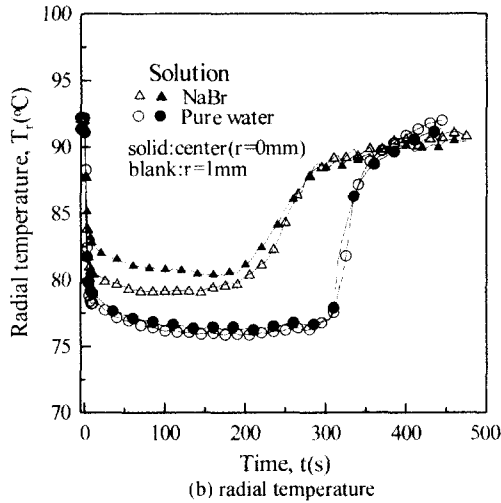
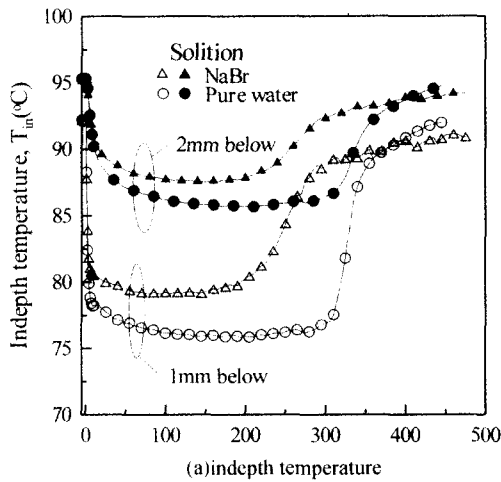


Fig. 5. The variation of indepth temperature of teflon for water and NaBr solution(30%, w/w) according to the time elapse ($d_0=2.6$ mm, $T_{s,0}=86.9^\circ\text{C}$).

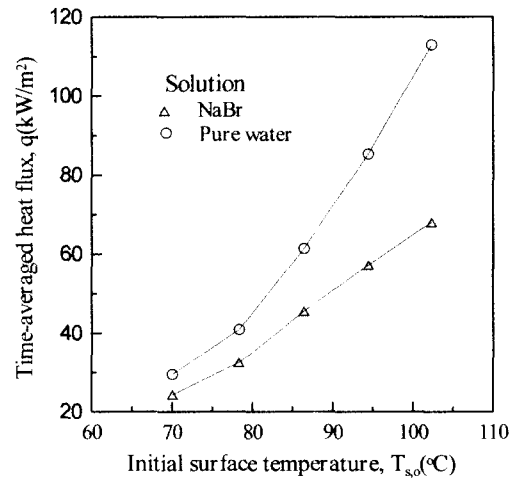


Fig. 6. The variation of time-averaged heat flux of carbon steel for water and NaBr solution(30%, w/w) according to the initial surface temperature elapse ($d_0=2.6$ mm).

심으로부터 $r=1.0$ mm 떨어진 곳 보다 크게 나타난다.

Fig. 5(a)와 비교하면 고온체 표면의 중심점에서 1.0 mm 깊이의 온도를 기준으로 고온체 내부방향으로 1.0 mm 더 깊은 점의 온도차가 고온체의 중심점 1.0 mm 깊이에서 반경 방향으로 1.0 mm 떨어진 곳의 온도차 보다 크게 나타난다.

Fig. 6은 액적 직경이 2.6 mm이고 고온체의 재질이 탄소강일 때, NaBr 수용액(30%, w/w)과 순수한 물에 대하여 고온체 표면의 초기 온도($T_{s,0}$)에 따른 증발기간 동안의 시간 평균 열유속(q)을 나타낸 그림이다.

시간 평균 열유속(q)은 액적의 증발기간 동안 고온체와 액적의 경계면에서 고온체로부터 액적으로 전달된 총열량을 액적의 초기표면적과 총 증발기간으로 나눈 값이며 식 (1)과 같다.

$$q = (2d_0 r \lambda) / (3t_i) \quad (1)$$

여기서 $\lambda' = \lambda + c_p(T_d - T_{\infty})$ 는 유효 증발잠열이고, T_d 는 액적의 시간 평균 온도이다.

고온체 표면의 초기 온도가 증가함에 따라 평균 열유속은 증가하며, 평균 열유속은 순수한 물이 NaBr 수용액 보다 크게 나타난다. 이는 NaBr 수용액에 포함된 첨가제의 영향으로 경계면에서 고온체에서 액적으로 열유속이 작기 때문이다. 또한 고온체 표면의 초기 온도가 낮은 영역에서는 순수한 물과 NaBr 수용액과의 열유속 차가 작게 나타나지만 온도가 상승할수록 차는 증가하고 있다.

즉 고온체 표면의 초기 온도가 높은 영역에서는

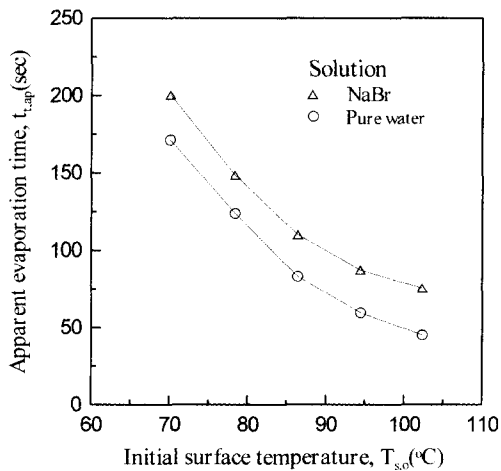


Fig. 7. The variation of apparent evaporation time of carbon steel for water and NaBr solution(30%, w/w) according to the initial surface temperature ($d_0=2.6$ mm).

NaBr 수용액의 경우가 액적 부착 초기 증발이 급격히 일어남에 따라 다량의 첨가제가 석출되고 이것이 고온체와 액적의 계면에서의 열저항으로 작용하여 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 7은 액적 직경이 2.6 mm이고 고온체의 재질이 탄소강일 때, NaBr 수용액(30%, w/w)과 순수한 물에 대하여 고온체 표면의 초기 온도에 대한 걸보기 증발시간을 나타낸 그림이다.

본 논문에서 정의된 걸보기 증발시간(t_{tap})은 액적이 부착된 후 액적이 증발하는 동안 촬영된 영상 자료로부터 수분이 완전히 증발하여 외부에 물의 흔적이 완전히 없어지는 상태까지 측정된 값으로 정의하였다.⁴⁾

전반적으로 고온체 표면의 초기 온도가 증가할수록 걸보기 증발시간이 감소하고 있으며, 증발시간은 NaBr 수용액이 순수한 물보다 길게 나타난다.

고온체 표면의 초기 온도가 증가할수록 걸보기 증발시간은 감소하는 것은 고온체 표면의 온도가 증가함에 따라 고온체면에서 액적으로 열전달이 증가하기 때문이다.

Fig. 8은 액적 직경이 2.6 mm이고 고온체의 재질이 테프론일 때, NaBr 수용액(30%, w/w)과 순수한 물에 대하여 고온체 표면의 초기 온도($T_{s,0}$)에 따른 증발기간 동안의 시간 평균 열유속(q)을 나타낸 그림이다.

고온체 표면의 초기 온도가 증가할수록 평균 열유속은 증가하고 있다. 또한 동일 고온체 표면의 초기 온도에 대해서는 순수한 물의 경우가 NaBr 수용액보다 높은 평균 열유속을 나타낸다.

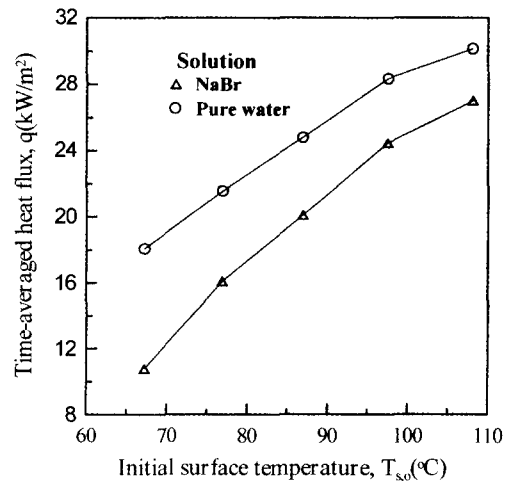


Fig. 8. The variation of time-averaged heat flux of teflon for water and NaBr solution(30%, w/w) according to the initial surface temperature elapse ($d_0=2.6$ mm).

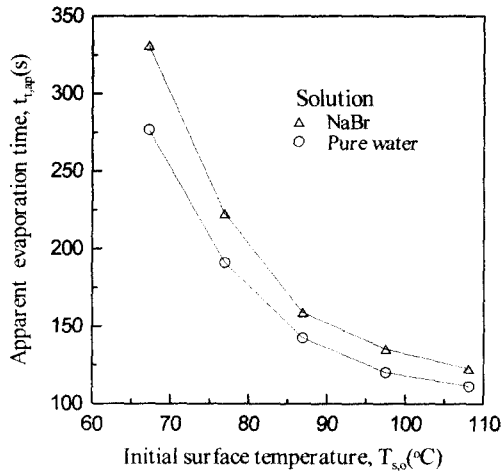


Fig. 9. The variation of apparent evaporation time of teflon for water and NaBr solution(30%, w/w) according to the initial surface temperature ($d_0=2.6$ mm).

Fig. 9는 액적 직경이 2.6 mm이고 고온체의 재질이 테프론일 때, NaBr 수용액(30%, w/w)과 순수한 물에 대하여 고온체 표면의 초기 온도에 대한 걸보기 증발 시간을 나타낸 그림이다.

전체적으로는 금속표면에서와 유사하게 고온체 표면의 초기 온도가 증가할수록 걸보기 증발시간은 감소하고 있으며 테프론의 열전도도가 낮기 때문에 고온체가 금속인 경우 보다 상당히 길게 나타난다. 또한 고온체의 종류에 상관없이 순수한 물의 증발시간이 NaBr 수용액보다 짧게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 NaBr가 첨가된 불소화제의 냉각 효과를 규명하기 위하여, 실제의 화재실험에서 우수한 성능을 나타낸 첨가제 NaBr(30%, w/w)를 사용하였다. 액적의 직경은 2.6 mm로 하였고, 고온체 재질로는 탄소강과 테프론을 사용하여 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액적 증발시 고온체 내부의 온도는 재질에 관계없이 순수한 물의 경우가 NaBr 수용액보다 낮게 나타났으며, 테프론의 경우가 탄소강보다 온도 변화가 크게 나타났다.
2. 평균 열유속은 재질에 관계없이 순수한 물의 경우가 NaBr 수용액 보다 크게 나타났다.
3. 걸보기 증발시간은 재질에 관계없이 순수한 물의 경우가 NaBr 수용액보다 짧게 나타났다.

이상의 결과에서 본 실험범위인 미연소의 고온체 표면에서의 NaBr가 첨가된 물의 냉각효과를 순수한 물과 비교한 결과 순수한 물의 경우가 보다 우수하게 나타났다.

기호설명

- ρ : 밀도, kg/m^3
- c_p : 정압비열, J/kg K
- d : 지름, mm
- q : 시간 평균 열유속, kW/m^2
- r : 반경, mm
- T : 온도, $^{\circ}\text{C}$
- t : 시간, sec
- λ : 증발잠열, J/kg

하첨자

- d : 액적
- in : 깊이방향
- max : 최대값
- o : 초기값
- r : 반경방향
- s : 표면
- t : 전체증발기간
- ∞ : 주위공기
- l : 액체
- ap : 걸보기 량

참고문헌

1. Michiyoshi I., Makino K., "Heat Transfer Characteristics of Evaporation of a Liquid Droplet on the Heated Surfaces", *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp605-613(1978).
2. Bonacina C., DelGiudice S., Comini G., "Dropwise Evaporation", *J. of Heat Transfer*, Vol. 101, pp441-446(1979).
3. Grissom W.M., Wierum F.A., "Liquid Spray Cooling of a Heated Surface", *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp261-271(1981).
4. King. M.D., Chien. W.J., Yang. J.C., and Grosshandler. W.L., "Evaporation of a Small Droplet Containing an additive", *National Heat Transfer conference*, Vol. 3, pp1-6(1997).
5. Qiao. Y.M., Chandra. S., "The Effect of Dissolving a Surfactant in Water Sprayed on a Hot Surface", *NIST Annual Conference on Fire Research*, pp17-

- 18(1996).
6. Tinker S, Darzo. M.D., Tartarni. P, Chandra. S, and Qiao. Y.M., "Effect of Dissolved Gasses and Effect of Surfactants", *NIST, International Conference on Fire Research and Engineering. Proceeding*, pp91-96(1995).
 7. Finnerty A.E., McGill R.L., Slack WA., "Water-Based Halon Replacement Sprays", ART-TR-1138, U.S. Army Research Lab, Aberdeen Proving Ground(1996).
 8. Cengel Y.A., Boles M.A., *Thermodynamics*, McGraw-Hill, Int. ed(1994).