

# 군사용 밀폐공간내의 화재시 단일 증발액적에 의한 방재특성 연구

The study of a fire fighting characteristic by a Single Evaporating Droplet in the case of a fire of military enclosure space

이진호\*      방창훈\*\*      김정수\*\*\*  
Jin-Ho Lee, Chang-Hun Bang, Jung-Su Kim

## ABSTRACT

A fire fighting characteristic by a single evaporating droplet in the case of a fire of military enclosure space was studied experimentally. Transient cooling of solid surface by water droplet evaporation has been investigated through controlled experiments using a heated brass cylinder. Quantitative predictions of droplet evaporation time and in-depth transient temperature distribution in solid have been made. The particular interest was in the removal of thermal energy from the heated cylinder by evaporative cooling. A  $10\mu\text{l}$  single droplet is deposited on a horizontal brass surface with initial temperatures in the range of  $90^{\circ}\text{C}\sim 130^{\circ}\text{C}$ .

The results can be summarized as follows; Evaporating droplet was divided into three different configuration. Evaporation time was predicted as a function of initial surface temperature ( $t_c = 492.62 - 6.89T_{s0} + 0.0248T_{s0}^2$ ). The contact temperature was predicted as a function of initial surface temperature ( $T_i = 0.94T_{s0} + 1.4$ ). The parameter  $\beta_0$  was predicted as a function of initial surface temperature ( $\beta_0 = 0.00312T_{s0} + 0.932$ )

주요기술용어 : Military Enclosure Space(군사용 밀폐공간), Single Evaporating Droplet(단일 증발액적), Fire Fighting Characteristic(방재특성)

## 1. 서론

오늘날 첨단 군용장비(전차, 함정, 통신시설 등) 및 시설(병커)에 설치되고있는 고성능 전자장비는 크기가 소형이면서 열밀도가 매우 높다. 이러한 전자장비

는 좁은 밀폐공간내에 설치되기 때문에 화재시 소화가 매우 어렵다. 뿐만 아니라 분말소화기 등 화학작용제에 의한 소화방법은 인원 및 장비에 치명적인 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서 군사용 밀폐공간내의 화재에 적합한 방법의 하나가 물을 이용한 방재방법 (fire fighting strategy)이다.

물을 이용한 방재방법은 연소 가능한 고체가 있는

\* 육군 3사관학교 기계공학과 부교수

\*\* 경북전문대학 소방안전과 조교수

\*\*\* 경북대학교 대학원 기계공학부

많은 종류의 화재에 적용되어왔다. 소화에 대해 분무의 액적 크기 분포가 가장 크게 영향을 주며, 다양한 화재 억제기구(fire suppression mechanism)가 주요한 역할로 작용한다. 짧은 시간내에 증발할 수 있는 매우 미세한 액적을 분무하는 water mist system의 경우는 화염의 열제거(냉각)와 산소제거를 동시에 한다<sup>(1)</sup>. 그러나 보다 큰 액적(coarse)의 경우, 연소표면의 액적 증발을 통한 연료의 냉각이 주요한 소화기구가 된다.

일반적으로, 스프링클러에서 방출된 물이 도달하기 쉬운 노출된 면에 대해서는 보다 큰 액적분무가 보다 효과적이다. Rasbash<sup>(2)</sup>에 의해 고찰된 많은 실험은 단지 수  $g(m^2s)$ 의 물만으로도 액적이 표면에 충돌하는 즉시 대부분의 고체화재를 소화시킬 수 있다는 것을 보여주었다. 반면, 기체상의 확산화염의 억제에는  $25\sim75g(m^2s)$ 을 요구한다<sup>(3)</sup>. 그러므로, 노출된 고체표면에 대해서는 상대적으로 큰 액적의 경우가 주요한 관심 대상이 되어왔다.

그러나, 이론적 방법을 통해 소화에 대한 임계 경계조건을 설명하기 위한 노력은 거의 없었다. 이러한 화재의 냉각소화는 diMarzo<sup>(3)</sup>등에 의해 가열된 반무한고체 위의 증발하는 단일 액적을 이용하여 이론적인 모델링을 성공적으로 수행하였다. 단일 액적증발에 의해 야기되는 국소표면 냉각이 발생하는 반무한고체의 열적거동은 Seki<sup>(4)</sup>에 의해 자세히 묘사되었다. Bonacina<sup>(5)</sup>는 액적증발에 대한 단순모델(simple model)을 유도하였고 이 모델에서 액적에 의한 표면 간섭에 영향을 주는 중요한 기하학적 변수를 찾았다. Grissom<sup>(6)</sup>은 가열된 면에 대한 분무의 냉각효과를 조사하였다. Michiyoshi와 Makino<sup>(7)</sup>는 단일액적의 증발 과정에 대한 열적 특성에 대한 자세한 고찰을 하였다. Sadhal<sup>(8)</sup>은 응축과 증발에 대한 액적-고체 상호작용의 흥미있는 분석을 제공하였다. Zhang<sup>(9)</sup>에 의해 보고된 고체표면 위의 액적형상에 대한 광학적 연구는 실제 액적형상을 구의 일부분(segment of sphere)

으로서 표현하는 것이 우수한 기하학적 표현이라는 것을 보여주었다.

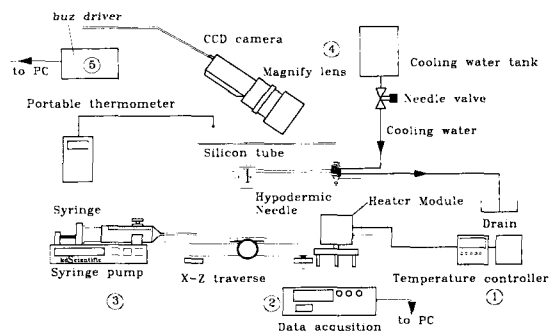
대부분의 연구는 증기화(vaporization)과정의 전체 범위(증발, 핵비등, 막비등, 천이비등을 포함한 과정)를 모두 다 보고하였다. 물 액적의 증기화에 대한 상세한 연구는 고체연료 화재소화의 열적모델에 대한 기초를 얻기 위하여 시도되었다. 그러나 이들 연구는 단지 증발현상에 대해서만 제한되었고, 고열전도도 금속(알루미늄)에 대해서만 연구가 수행되었다.

그러나 군사용 밀폐공간내의 실재 화재가 발생하는 면은 열전도도가 떨어지고 또한 다양한 물질로 구성되어있다. 따라서 본 논문에서는 고열밀도의 고성능 전자장비 또는 포탄과 탄약 등 높은 열전도성을 모사하기 위하여 황동을 가열면으로 선정하여 냉각특성을 연구함으로써 실재 화재에 적용할 수 있는 합리적인 결과를 얻고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치들의 배열을 개략적으로 나타낸 그림이다. 실험장치는 크게 전원 공급부①, 데이터 처리부②, 유량공급부③, 제어부④,



(Fig. 1) Schematic of experimental apparatus.

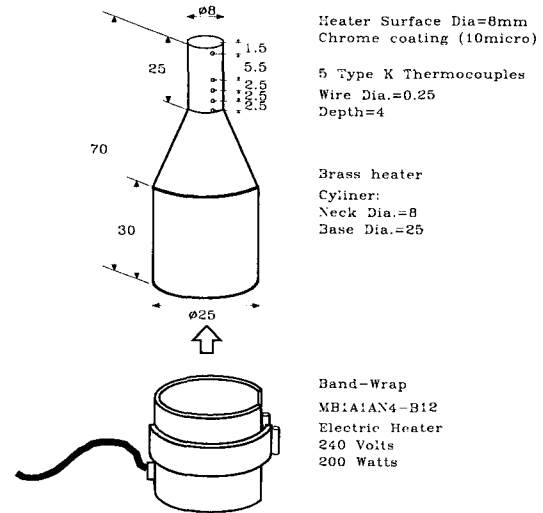
영상촬영부⑤로 구성되어있다. 또한 전체 실험부는 외부의 영향을 최소화하기 위하여 스티로폼으로 외부 격벽을 만들어 내부에 위치시켰다.

전원공급부①는 가열모듈하부에 부착된 열전대의 온도를 이용하여 제어하는 온도제어기(Fuji, PXW-9)과 전원공급기(SPC-101)로 구성되어있다. 데이터 처리부②는 가열모듈에 부착된 5개 및 액적발생기에 부착된 1개의 K형 열전대의 데이터를 측정하기 위한 데이터 처리장치(FLUKE, 2640)와 이를 처리하기 위한 개인용 컴퓨터(PC)로 구성되어있다.유량공급부③는 정유량 발생기(KDScientific Model 100)와 액적을 발생시키는 액적발생기 및 주사바늘, 액적의 위치를 정확하게 유지시키기 위한 X-Z Traverse로 구성되어 있다. 제어부④는 액적발생기의 온도를 제어하기 위한 냉각수 탱크와 유량조절 밸브, 액적발생기를 냉각시키기 위한 열교환기로 구성되어 있다. 영상촬영부⑤는 고해상도 CCD 카메라(mythos)와 CCD 카메라에서 얻은 영상을 처리하기 위한 영상처리장치(iomega co., buz) 및 조명장치(반사광을 이용한 간접조명)로 구성되어있다.

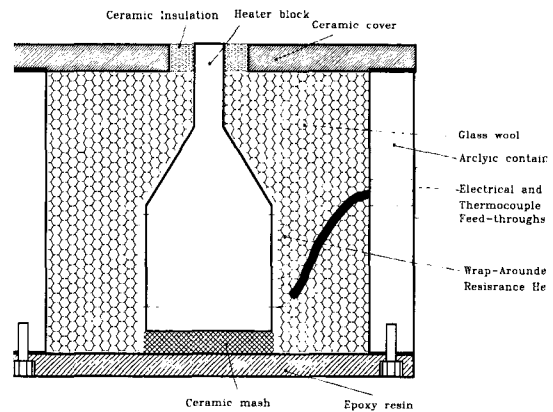
Fig. 2는 발열체와 발열모듈의 기하학적 크기 및 열전대의 부착위치를 나타낸 그림이다.

Fig. 2(a)는 발열체의 형상과 열전대의 위치를 보여 주며 히터의 조립도를 보여준다. 사용된 발열체의 형상은 전체 길이가 70mm이고 목(neck)부분 직경이 8mm, 하부 직경이 25mm인 원통형이다. 열전대는 발열체의 표면으로부터 깊이 1.5mm, 7mm, 9.5mm, 12mm, 14.5mm에 각각 5개 부착되었으며 온도제어용 열전대는 깊이 68mm에 1개 부착되었다. 히터는 240V, 200W인 밴드형(MB1A1AN4-B12)을 사용하였고, 히터와 발열체사이의 열전도도를 증가시키고 산화를 방지하기 위하여 와트러브(WATLUBE, heater release and heat transfer agent)를 사용하였다. 발열체

의 표면은 10 $\mu$ m의 크롬을 도금하였다.



(a) heating block



(b) heating module

(Fig. 2) Geometries of heating block and heating module.

Fig. 2(b)는 가열모듈의 형상과 사용된 재료를 나타낸 그림이다. 발열체는 히터와 조립되어 아크릴과 에폭시레진으로 구성된 틀 속에 놓여진다. 이 때 발열체의 열이 하부로 손실되는 것을 방지하기 위해

여 발열체와 하부틀사이에 세라믹 메쉬를 부착하였다. 또한 상부 덮개는 세라믹으로 제작하여 히터의 목부위에서 덮개로 전도되는 열량을 최소화 하였다. 발열체를 둘러싸고 있는 공간은 대류 및 전도에 의한 손실이 발생할 수 있으므로 유리섬유로 충전하여 열손실을 최소화 하였다.

## 2.2 실험방법

본 실험에서는 발열체의 깊이방향 1.5mm에서의 온도변화가  $\pm 0.5(^\circ\text{C}/\text{hr})$ 일 때를 정상상태에 도달하는 기준으로 정하였다. 정상상태에 도달하는 시간은 약 20분 정도 소요되었다. 전체 실험조건과 주위조건 및 액적의 조건은 Table 1에 나타내었다.

1회 실험을 수행할 경우 동일 조건하에 3번 실시하고 실험조건의 온도범위에서 최소온도로부터 온도를 증가시키며 실험을 수행하여 최고 온도에 도달하면 다시 온도를 감소시키며 실험을 수행하였다.

액적의 크기는 정유량 발생기(KDScientific Model 100)를 이용하여 일정 유량을 발생하게 하여 조정하였다. 이때 액적유량의 정확성을 확인하기 위해 동일 조건에서 20방울과 50방울을 비이커에 받아서 정밀 전자저울(Chyo balance co., JL-180)을 이용하여 측정

(Table 1) The condition of experimental research

Variable	condition	specification
surrounding temperature	$24.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$	using the constant temperature air conditioner
droplet temperature	$23.5 \pm 0.25^\circ\text{C}$	using the cooling heat exchanger
heating block surface temperature	$90 \sim 130^\circ\text{C}$	using the power supply and controller
droplet volume	$10 \mu\text{l}$ ( $d=2.673\text{mm}$ )	22gage stainless needle

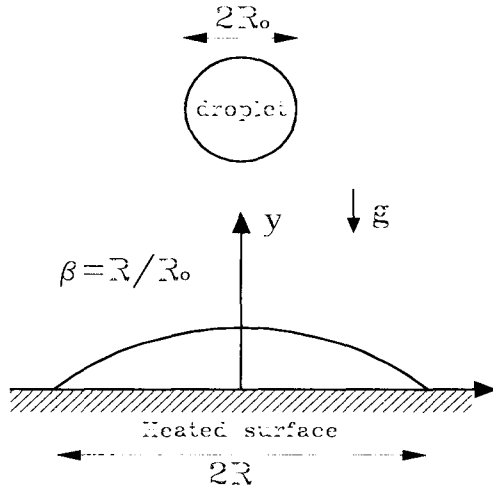
한 결과 약 4%의 오차를 발생시켰다.

액적증발 사진촬영은 CCD카메라를 이용하여 1/30sec 단위로 촬영 저장한 후 이를 영상처리 프로그램을 이용하여 분석하였다. 증발시간은 동일 조건을 3회 반복 촬영하여 분석하였고 각 상태별 증발형상은 전체 영상기록중 일부를 발췌하였다.

## 2.3 이론적 모델선정

Fig. 3은 충돌하는 액적의 형상과 좌표축 및 파라미터  $\beta$ 를 나타낸 그림이다. 고체표면에 충돌하는 구형액적은 고체표면 위로 넓게 퍼지고 액체의 최종형상은 아주 많이 변하며, 다양한 매개변수에 의존한다. 포화온도에 가까운 상태로 표면에 충돌하는 물의 경우, 모양은 구의 일부분(spherical segment)로 고려될 수 있다<sup>(3)-(5)</sup>. 또한 액적의 체적이 크지 않다면 반무한 고체 표면에서 액적의 직경은 대부분의 증발과정동안 같은 크기로 남아있다. 부착된 액적의 반경에 대한 동일한 체적의 구형액적의 비를 파라미터  $\beta$ 로 정의하였다<sup>(3)</sup>. 초기 액적모양에 영향을 주는 파라미터의 복잡성(표면장력, 표면습윤성 등) 때문에 이와 같은 단순한 파라미터를 이용하여 보다 단순한 해석을 수행할 수 있다. 파라미터  $\beta$ 에 대한 액적의 운동에너지(충돌 전)의 영향은 1.7cm보다 낮은 높이에서 액적을 방출시킴으로 무시할 수 있다. 이런 경우 액적은 “부드럽게” 부착된 액적<sup>(3)</sup>으로 고려된다. Bonacina 등<sup>(5)</sup>은 이 경우  $\beta$  값이 1.2~1.5범위로 나타난다고 하였다. 그러나 분무된 물에 대해서 몇몇 연구자는  $\beta$  값이 4.5까지 나타난다고 하였다.<sup>(10)</sup> 이  $\beta$  값은 증발 시작( $t=0$ )전, 즉 부착시에 초기조건으로 고려된다. 증발과정동안 임의 시간에 액체의 체적에 기초한 보다 일반적인 변수  $\beta(t)$ 에 대한 값은 습윤면적의 반경을 기준으로 사용하고 현재 남아 있는 물의 순간적인 체적과 동일한 체적을 가지는 구형액적의 반경을 가

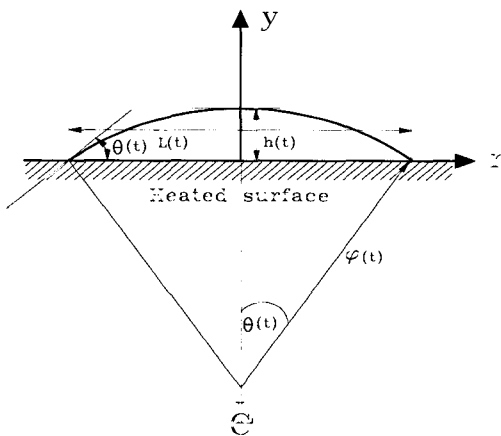
지고 일반화하여 계산되어질 수 있다.



[Fig. 3] Parameter  $\beta$  and coordinate system.

임의 시간 체적은 Fig. 4를 기준으로 아래와 같이 계산된다.

$$V(t) = \frac{1}{3} \pi h(t)^2 [3\varphi(t) - h(t)] \quad (1)$$



[Fig. 4] Droplet geometry for heat transfer analysis.

사진관독을 통하여  $\theta(t)$ ,  $L(t)$ ,  $h(t)$ 를 측정하고 이

값을 대입하여 각 시간별 체적을 구할 수 있다.

초기조건( $t=0$ )일 때 각각  $\theta_0$ ,  $L_0$ ,  $h_0$ 로 두면

$$\varphi_0 = \frac{L_0}{2 \tan \theta_0} \quad (2)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} h_0^2 \left( \frac{3L_0}{2 \tan \theta_0} - h_0 \right) \quad (3)$$

액적이 떨어질 때 액적의 반경이  $r_i$ 이면 액적의 체적은

$$V^* = \frac{4}{3} \pi r_i^3 \quad (4)$$

이고, 낙하시 체적은 증발시작( $t=0$ )일 때의 체적과 동일하다. 즉,  $V^* = V_0$

$$\frac{4}{3} \pi r_i^3 = \frac{1}{3} \pi h_0^2 \left( \frac{3L_0}{2 \tan \theta_0} - h_0 \right) \quad (5)$$

$$r_i = \sqrt[3]{\frac{h_0}{4} \left( \frac{3L_0}{2 \tan \theta_0} - h_0 \right) t} \quad (6)$$

$$\beta_0 = \frac{L_0}{2r_i} \quad (7)$$

만일 임의시간에 대한 파라미터  $\beta(t)$ 를 구하면

$$\varphi(t) = \sqrt[3]{\frac{h}{4} \left( \frac{3L}{2 \tan \theta} - h \right)} \quad (8)$$

$$\beta(t) = \frac{L(t)}{2\varphi(t)} \quad (9)$$

Wayner<sup>(11)</sup>는 습윤면적이 일정할 때 액적의 증발과 정동안 액체-고체 접촉각을 계산하는 모델을 제안하였다.

매개변수  $\beta$ 의 중요성은 그것이 수많은 변수의 영향을 설명하기 때문이다. 즉, 표면조건(wettability, roughness, etc), 유체조건(표면장력, wetting ability,

etc)과 액적부착 과정을 특성화하는 값이다. 현재 모든 실험 데이터는 증류수가 얇은( $=10\mu\text{m}$ )크롬층으로 피막된 황동표면에 놓여진 경우에 대한 값이다. 크롬은 황동표면을 매끈하게 하고(거칠기  $0.1\sim 0.15\mu\text{m}$ ), 굽힘에 잘 견디도록 하기 위해 증착 되어졌다.

각 액적이 부착되기 전에 표면은 입자와 유지를 제거하기 위해 에틸알코올로 닦여진다. 이러한 주의 깊은 과정에도 불구하고 실험결과에서 약간의 산포가 관찰되었다. 이 산포(scatter)는 액적의 부착 방법에 의해 유발되는 것으로 생각된다. 즉, 표면 위에서 물을 방출하기 위해 사용되는 주사바늘의 위치선정에 약간의 불확실성이 존재하는 것으로 사료된다.

실험 결과에서  $\beta$ 의 온도 의존성은 보다 명백하게 나타난다. 특별히 낮은 온도 범위에서도 대부분의 데이터는 평균값의 선형회귀(linear regression)에 대해 5% 오차범위에 든다.

$$\beta_0 = 0.00312 T_{s0} + 0.932 \quad (10)$$

액적에 의해 유발되는 냉각특성은 경계조건을 복잡성 때문에 이론적인 연구가 매우 힘들다. 액적에 대해 사용된 에너지 방정식의 경계조건은 고체에 사용된 에너지 방정식의 경계조건과 일치하여야 한다. 즉, 열유속과 온도는 액체-고체 경계조건에서 각 시간과 각 위치에서 동일하게 놓여야 한다. 그러므로 이를 단순하게 처리하기 위해서 몇 가지 가정이 요구된다.

Seki<sup>(4)</sup>에 의해 제안된 모델은 단순화된 가정에 기초한다. 그는 고체-액체 경계가 균일하고 일정한 온도로 유지된다고 가정했다. 이 가정은 금속의 높은 열전도도에 의해 그 정당함이 입증되었다. 액적증발을 위해 요구되는 열유속은 고체에서 온도기울기가 작다. Michiyoshi<sup>(7)</sup>는 고체-액체 접촉면 온도는 시간에 따라 거의 변하지 않는다는 것을 실험적으로 증

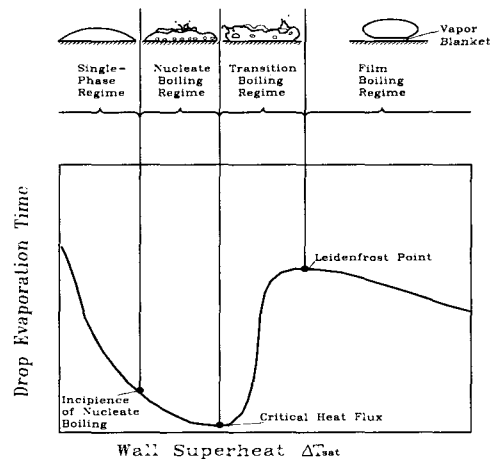
명하였다. 따라서 액적 아래영역이 균일하고 일정한 온도  $T_i$ 가 된다고 가정하는 경계조건은 합당하다. 이러한 가설의 이점은 고체에 대한 에너지 방정식이 액적거동으로부터 독립적으로 적분될 수 있고 고체 냉각에 대한 정보를 얻기 위해서는 단지 전체 증발 시간만이 요구된다.

고체 내에서 발생할 수 있는 최대 가능한 온도변화는 액적이 부착되기 이전의 고체 표면온도와 Seki<sup>(4)</sup>에 의해 주어진 접촉면온도 사이의 차이이다. 접촉면 온도는 다음과 같이 정의된다.

$$T_i = \frac{T_w \cdot \gamma_w + T_s \cdot \gamma_s}{\gamma_w + \gamma_s} \quad (11)$$

이 접촉면 온도는 가열면의 재질에 따라 값이 다르게 나타나고, 실제 액체의 비등은 이 온도를 기준으로 생각해야 하므로 임계열유속점이나 Leidenfrost 점등이 이 값에 의해 좌우된다.<sup>(7)</sup>

Fig. 5는 표면과열도에 대한 증발시간을 도식적으로 나타낸 그림이다. 각 표면과열도에 대한 액적의 증발시간과 증발형상을 보여주며, 증발시간이 가장 짧은 경우가 임계열유속점에 해당하면 다시 증가하



(Fig. 5) Sessile drop evaporation curve.

여 최대 값을 나타내는 경우가 Leidenfrost점을 나타낸다.

본 실험은 증발(evaporation)영역과 핵비등이 시작하는 영역에 대해서만 고려하였다. 더 이상의 영역은 이후에 연구할 계획이다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 6(a)는 초기 고체표면 온도( $T_{s0}$ )가  $90.71^{\circ}\text{C}$ 이고 접촉면 온도( $T_i$ )가  $85.87^{\circ}\text{C}$ 일 때 시간에 따른 깊이방향 온도 변화를 나타낸 그림이다.

고체 내부의 온도변화는 액적충돌 후 급격히 감소하다 다시 서서히 감소한다. 이후 일정 값에 도달한 후 약간 온도가 상승하고 다시 최소 값을 나타낸 후 증가하여 초기온도로 회복한다. 급격한 온도감소가 발생하는 구간은 액적이 충돌후 고체 표면온도가 초기 온도에서 접촉면 온도로 약  $5^{\circ}\text{C}$ 정도 떨어지므로 나타나는 현상이다. 또한 온도가 서서히 감소하는 것은 내부로 열침투가 서서히 일어나기 때문이고 다시 온도가 상승하는 구간은 액적의 증발에 비해 공급되는 열량이 크기 때문으로 사료된다. 다시 최소 값으로 감소하는 구간은 액적의 일부가 증발하여 액적의 두께가 감소하므로 액적에 의한 열저항이 감소하여 나타난 것으로 생각된다.

깊이 방향으로 온도 변화는 전반적으로 비슷한 경향을 나타내고 있으나 완만한 변화를 보여주고 있다. 이는 깊이방향으로 열의 침투와 확산에 의해 나타나는 것이다.

온도범위에 따라 약간의 차이가 있으나 증발완료 시간은 회복온도가 초기온도의 약 99%정도일 때로 나타났다.

Fig. 6(b)는 초기 고체표면 온도가  $94.96^{\circ}\text{C}$ 이고 접촉면 온도가  $89.92^{\circ}\text{C}$ 일 때 시간에 따른 깊이방향 온도 변화를 나타낸 그림이다.

고체 내부의 온도변화는 액적충돌 후 급격히 감소하다 다시 서서히 감소하여 최소 값을 나타낸다. 이는 액적이 충돌후 연속적으로 두께가 얇아지면서 액적에 의한 열저항이 감소하므로 온도가 서서히 감소하는 것으로 생각된다. 깊이방향으로 온도변화는 Fig.6(a)와 비슷하게 나타나며 깊이방향으로 온도강하비율도 유사하게 나타나고 있다.

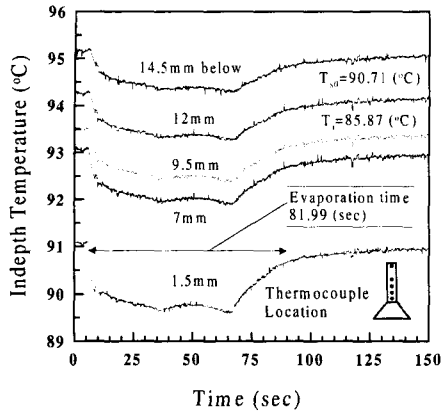
Fig. 6(c)는 초기 고체표면 온도가  $108.24^{\circ}\text{C}$ 이고 접촉면 온도가  $105.22^{\circ}\text{C}$ 일 때 시간에 따른 깊이방향 온도 변화를 나타낸 그림이다.

전반적인 온도변화는 Fig. 6(a), Fig. 6(b)와 유사하지만 급격한 온도 감소후 서서히 감소하는 구간이 미소하게 형성되고 급격한 2차 감소가 나타난다. 이는 표면초기온도가 물의 포화온도보다 높기 때문에 액체 내부에서 기포가 형성되고 이 기포가 파열하면서 열전달량이 증가하여 급격한 2차 감소가 일어난다. 촬영된 영상자료를 분석한 결과 기포의 파열후 액적이 원래 크기의 약 2/3정도로 감소하고 이 과정에 의해 열전달이 증가한 것으로 사료된다.

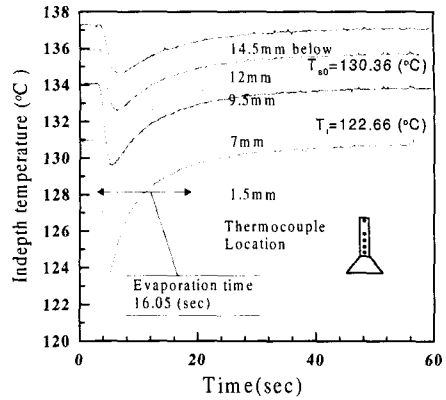
Fig. 6(d)는 초기 고체표면 온도  $130.36^{\circ}\text{C}$ 이고 접촉면 온도가  $122.66^{\circ}\text{C}$ 일 때 시간에 따른 깊이방향 온도 변화를 나타낸 그림이다.

표면온도가 증가함에 따라 온도감소가 더욱 증가하며, 온도가 서서히 감소하는 구간은 거의 사라지고 없다. 또한 급격한 2차 온도감소도 나타나지 않는다. 이는 충돌직후 액적이 얇은 막의 형태로 변하고 액막의 선단에서리가먼트(ligament)가 형성되어 일부가 위성액적(satellite droplet)을 형성하며 동시에 증발하기 때문으로 사료된다. 이와 같은 형상은 영상촬영 자료로부터 확인할 수 있으며 이에 대해서 다음에 다시 설명할 것이다.

Fig. 7은 액적의 체적이  $10 \mu\text{l}$ 일 때, 초기 표면온도에 대한 액적 증발시간을 나타낸 그림이다.

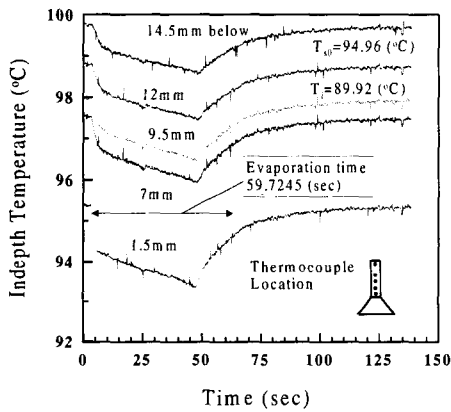


(a) initial surface temperature of 90.71°C

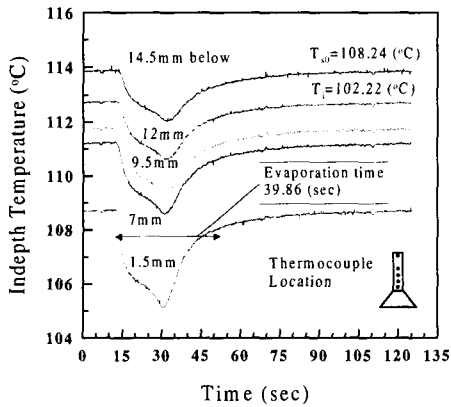


(d) initial surface temperature of 130.36°C

(Fig. 6) In-depth temperature with time for 10  $\mu$ l water droplet



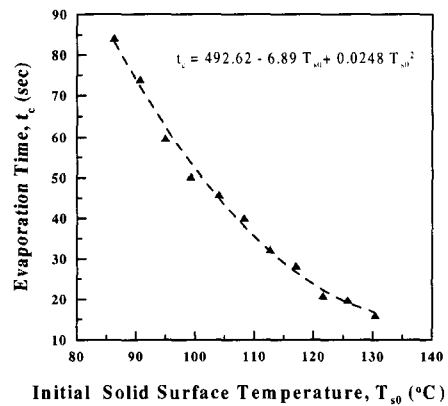
(b) initial surface temperature of 94.96°C



(c) initial surface temperature of 108.24°C

초기 표면온도가 증가함에 따라 증발시간은 급격히 감소하고 있으며 감소율은 서서히 감소하고 있다. 이는 초기 표면온도가 증가하여 열유속이 증가하므로 열전달량이 증가하여 물질전달을 증가시키기 때문이다. 본 실험조건에서 초기표면온도에 대한 증발시간을 곡선접합을 통하여 아래와 같이 구하였다.

$$t_c = 492.62 - 6.89T_{s0} + 0.0248T_{s0}^2 \quad (12)$$



(Fig. 7) Evaporation time .vs. Initial surface temperature.



본 실험영역은 Fig. 5에서 나타난 증발영역과 핵비등영역을 포함하지만 임계 열유속점보다는 다소 낮은 영역에 대한 실험결과이므로 초기 표면온도가 증가할수록 증발시간이 감소한다.

Fig. 8은 액적의 체적이 10 μl일 때, 초기 표면온도에 대한 접촉면온도를 나타낸 그림이다. 고체-액체 접촉면 온도는 식(11)을 이용하여 구하였으며, 이 온도는 액체의 비등현상과 직접적인 영향을 가지므로 고체표면에 부착된 액적의 거동을 표현하는데 중요한 변수가 된다. 또한 고체면의 액체(액적)이 부착되면 반무한 고체표면과 같이 반응하게 되고, 이때 접촉면의 온도를 측정하여 열적거동을 해석적으로 설명할 수 있다.

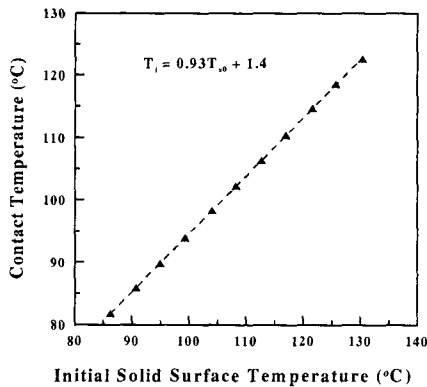
본 실험범위에서 황동의 열물성치는 실험구간에 대한 값을 선형보간하여 아래와 같은 식을 사용하였다.

$$k_s = -0.0005(T_{s0} + 273)^2 + 0.564(T_{s0} + 273) - 12.8 \quad (13)$$

$$Cp_s = 0.15(T_{s0} + 273) + 335 \quad (14)$$

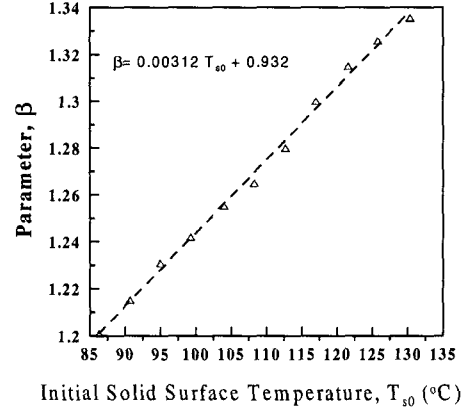
본 실험범위에서 초기 표면온도를 이용하여 접촉면의 온도를 예측할 수 있는 상관식을 다음과 같이 구하였다.

$$T_i = 0.94T_{s0} + 1.4 \quad (15)$$



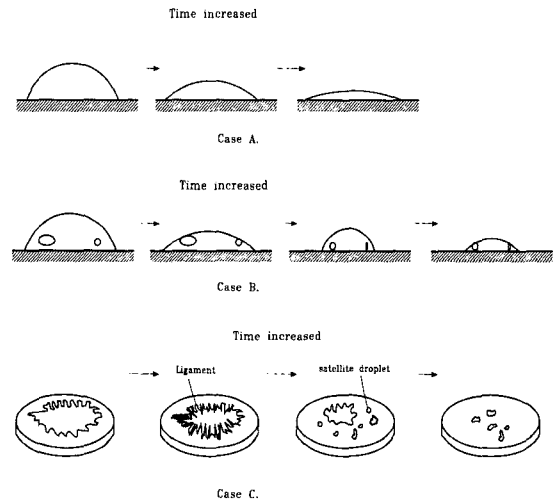
(Fig. 8) Contact temperature .vs. Initial surface temperature

Fig. 9는 액적의 체적이 10 μl일 때, 초기 표면온도에 대한 파라미터 β의 변화를 나타낸 그림이다.

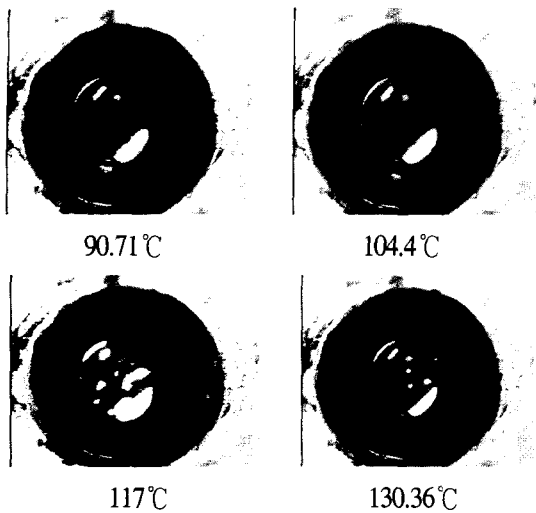


(Fig. 9) Parameter β .vs. Initial surface temperature.

전체적으로 표면온도가 상승할수록 파라미터 β의 값이 증가하고 있다. 이는 표면온도가 증가할수록 액적의 점성이 감소하고 표면장력도 감소하여 액적의 형상이 넓게 퍼지기 때문이다. 이는 영상촬영 기록을 통한 결과로부터 확인할 수 있다.



(a) Schematic representation



(b) Photograph result

(Fig. 10) Schematic representation of three forms of evaporation regime and photograph result for each Initial surface temperature at  $t_c = 0$

초기 표면온도가 증가하면 접촉면의 온도가 상승하고, 액적의 접촉면적도 증가하여 열유속이 급격히 증가할 것을 예측할 수 있다.

Fig. 10은 영상촬영 기록을 통하여 얻은 비등영역을 개략적으로 표현한 그림과 초기 표면온도에 따른 액적의 초기형상을 CCD카메라로 촬영한 사진이다. 실험범위 내에서는 대략 3개 증발영역으로 구분되며 각 증발영역의 특성이 그림에서 표현되어있다.

case A는 표면온도가 86.3°C ~ 99.27°C에서 나타나고 case B는 표면온도가 104.04°C ~ 117°C에서 나타나며, case C는 121.6°C ~ 130.36°C에서 나타났다. case A의 경우는 액적이 포화온도이전에 있으므로 외기의 증기 몰농도와 액적표면에 형성된 증기의 몰농도사이의 차이에 의한 물질전달이 지배적으로 나타나고 이로 인한 열전달이 주요 열전달 기구가 된다. 그러나 case B의 경우는 액적아래의 표면온도가 물의 포화온도보다 높게 되어 액적내부에 미세한 기포를 형

성하고 이로 인한 열전달이 증가하게 된다. 또한 case C의 경우는 물의 포화온도보다 조금 높으며 접촉면의 온도가 물의 포화온도보다 높아서 액적이 접촉하자마자 비등이 시작하기 때문에 그림에서 나타난 것처럼 액막으로 퍼지면서 액적의 테두리 부근에서 리가먼트를 형성하고 이 리가먼트 끝에 형성된 위성액적이 중심에 남아있는 액적과 동시에 증발하므로 열전달이 급격히 증가하여 증발시간이 매우 작게 나타난다.

#### 4. 결 론

군사용 밀폐공간내의 고 열밀도의 고성능 전자장비 또는 고 열전도성 재질인 탄약 등의 가열면에서의 화재시 단일 증발액적에 의한 표면냉각에 대한 방재특성을 연구하였다. 특히, 액적(초기 액적의 직경 2.673mm)이 가열되는 고온의 발열체 표면(90°C ~ 130°C)에서 증발할 때, 증발시간, 발열체 내부의 시간에 따른 온도분포, 접촉면온도, 파라미터  $\beta$ 의 변화를 고체표면의 초기 온도에 따라 구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 액적이 표면에 부착될 때, 내부의 온도분포는 초기 표면온도에 따라 각각 상이한 분포를 나타내고 있다. 특히 저온영역(90°C부근)에서는 2차 최소값을 갖는 영역이 나타났다.

둘째, 초기 표면온도가 상승할수록 접촉면 초기 온도가 상승하였으며 그 변화가 거의 선형적으로 나타났다으며 다음과 같은 상관식을 구할 수 있다.

$$T_i = 0.94T_{s0} + 1.4$$

셋째, 액적의 증발시간은 초기 표면온도가 증가할

수속 증가하며 그 증가율은 서서히 감소하고 있다. 증발시간은 증발에 의한 열전달량의 크기를 나타낸다.

$$t_c = 492.62 - 6.89T_{s0} + 0.0248T_{s0}^2$$

넷째, 액적의 파라미터  $\beta$ 는 초기 표면온도가 증가할수록 증가하며 액적의 증발시간 감소와 비례한다.

### 참 고 문 헌

1. J. R. Mawhinney, B. Z. Dlugogorski, A. K. Kim, 1994, "A closer look at the extinguishment properties of water mist," *Fire Safety Science, Proc. 4th Int. Symp.*, pp. 47-60
2. D. J. Rasbash, 1985, "The extinction of fire with plain water: a review," *Fire Safety Science Proc. 1st Int. Symp.*, pp. 1145-1163
3. M. diMarzo, P. Tartarini, Y. Liao, 1993, "Evaporative cooling due to a gently deposited droplet," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 17, pp. 4133-4139
4. M. Seki, H. Kawamura, K. Sanokawa, 1978, "Transient temperature profile of a hot wall due to an impinging liquid droplet," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 100, pp. 167-169
5. C. Bonacina, S. Del Giudice, G. Comini, 1979, "Dropwise evaporation," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 101, pp. 441-446
6. W. M. Grissom, F. A. Wierum, 1981, "Liquid spray cooling of a heated surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 261-271
7. I. Michiyoshi, K. Makino, 1978, "Heat transfer characteristics of evaporation of a liquid droplet on heated surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 605-608
8. S. S. Sadhal, M. S. Plesset, 1979, "Effect of solid properties and contact angle in dropwise condensation and evaporation," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 101, pp. 48-54
9. N. Zhang, W. J. Yang, 1982, "Natural convection in evaporating minute drops," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp.656-659
10. J. J. Rizza, 1981, "A numerical solution to dropwise evaporation," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 501-507
11. P. C. Wayner, 1973, "Fluid flow in interline region of an evaporating no-zero contact angle Meniscus," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 1777-1783