

액적의 Weber 수에 따른 냉각특성의 변화

방창훈[†] · 양창호^{*}

경북전문대학 소방안전관리과 · *LG전자
(2002. 11. 15. 접수 / 2003. 1. 3. 채택)

The Variation of Cooling Characteristics Due to the Weber Number of Droplet

Chang-Hoon Bang[†] · Chang-Ho Yang^{*}

Department of Fire Protection Engineering, Kyungbuk College · *LG Electronics
(Received November 15, 2002 / Accepted January 3, 2003)

Abstract : The objective of the present work is to examine the variation of cooling characteristics due to the Weber number of droplet on a heated surface. The surface temperatures varied from 72.5~106.1°C on steel and Teflon, when Weber number was 60, 180, 300. The results are as follows; in the case of the same droplet size, the initial temperature of solid increases the in-depth temperature of solid more drop. In the case of the same surface temperature, Weber number increases with increasing the cooling effect of droplet. The time-average heat flux increases with increasing the initial temperature of solid and Weber number. The evaporation time decreases with increasing the initial temperature of solid and Weber number.

Key Words : droplet, weber number

1. 서 론

소화제로 사용되는 물질에는 여러 가지가 있으며, 그 중에서 물은 가격이 저렴하고 변질의 우려가 없으며, 인체에 무해하여 소화제로 가장 많이 사용된다. 물의 물리 화학적 특징으로는 비열이 매우 커서 많은 열량을 흡수하며, 큰 증발잠열로 인하여 기화시 다량의 열을 주위에서 빼앗아 가연물을 냉각시킨다. 또한 기화 팽창률이 커서 수증기가 연소면을 덮어 질식 소화효과를 일으킨다.

물의 소화성능을 향상시키기 위한 연구가 최근 활발히 이루어지고 있으며, 최적의 냉각성능을 나타내는 조건을 구명하는 것이 실제 적용에 있어서의 전제 조건이다.

DiMarzo 등¹⁾은 물을 증발 유체로 하여 표면 온도에 따른 증발시간, 증발체적, 국소 열유속 등의 실험 및 수치 해석적 연구를 수행하였으며, 실험결과

와 수치 해석적 모델의 결과가 잘 일치함을 보고하였다. Klassen 등²⁾은 Marco 표면에 놓인 단일 물 액적의 증발 냉각을 열 화상 처리장치를 이용하여 실험적으로 연구하였다. Abu-Zaid 등³⁾은 다공질 및 비다공질 세라믹 표면에 놓인 단일 물 액적의 증발 냉각을 실험적으로 연구하였다. 실험결과 증발시간은 동일 실험 조건 하에서 비다공질 고체가 다공질 고체보다 길게 나타났으나, 액적이 영향을 미치는 영역은 다공질 고체가 더욱 크다는 것을 밝혔다. 유갑종 등⁴⁾은 가열된 고체표면에 부착된 단일액적의 증발냉각 특성을 가열고체의 재질과 액적의 크기를 변화시켜 실험적으로 연구하였다. Bernardin 등⁵⁾은 알루미늄 표면에서 충돌액적의 열전달 및 유체역학적 거동을 실험적으로 연구하였다. 고착액적과 충돌액적이 상이한 열전달 및 유체역학적 거동을 보이며, 표면조도가 액적의 증발냉각특성에 큰 영향을 준다는 것을 밝혔다. Wachters 등⁶⁾은 수평표면에 부딪치는 액적의 충돌과 분열이 Weber수에 따라 3개의 일반적인 범주로 나누어 질 수 있음을 보여주었

[†]To whom correspondence should be addressed.
bch@mail.kbc.ac.kr

다. Akao 등⁷⁾은 물, 계면활성제를 포함한 물, 에탄올, 아세트산을 이용하여 300~500℃로 가열된 구리 면에서 최대 확장직경과 전열면적을 측정하였다. Ko 등⁸⁾은 고온표면에 충돌하는 액적의 분열거동을 연구하기 위하여 LFP영역에서 n-decane을 이용하여 실험적으로 연구하였다.

상기의 연구들은 대부분 액적의 크기, 고체 표면의 재질, 온도 등에 따른 영향을 연구하였다. 그러나 대부분의 경우 분무된 액적은 임의의 속도로 고체 표면에 충돌하여 증발한다. 따라서 액적의 충돌속도가 가열고체의 냉각특성에 미치는 영향에 대한 보다 자세한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 액적의 Weber 수에 따른 냉각 특성을 규명하기 위하여 액적의 충돌속도를 변화하여 실험하였다. 또한 가열 고체의 열전도도에 따른 영향을 규명하기 위하여 탄소강을 선택하였으며, 고분자 물질로는 테프론을 사용하였다.

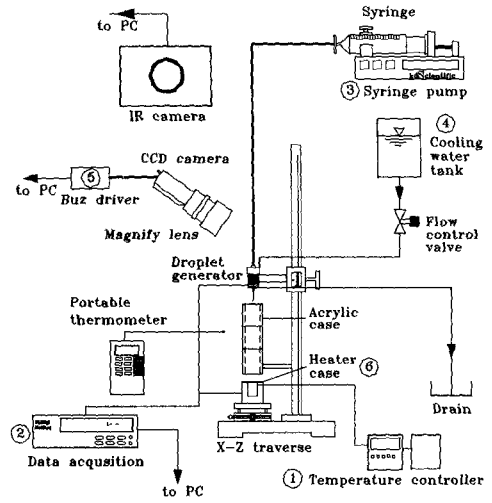


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

Fig 1은 전체 실험 장치를 개략적으로 나타낸 그림이다.

온도 제어부 ①은 가열 모듈 하부에 부착된 열전대의 온도를 이용하여 제어하는 온도 제어기(Fuji, pxw-9)와 전원 공급기(Spc-101series)로 구성되어 있다. 데이터 처리부 ②는 가열 모듈에 부착된 K형 열전대의 데이터를 처리하기 위한 데이터 처리장치(Fluke, 2640A)로 이루어져 있다. 유량 공급부 ③은 액적의 속도 및 크기를 조절하기 위한 정유량 조절기(KD scientific model 100)와 액적 발생기 및 액적의 직경을 조절하기 위한 니들과 소형 X-Z Traverse로 구성되어 있다. 냉각수 제어부 ④는 액적 발생기의 온도를 제어하기 위한 냉각수 탱크와 유량 조절 밸브, 열 교환기로 구성되어 있다. 영상 처리부 ⑤는 고해상도 CCD 카메라와 영상 처리장치로 구성되어 있다. 또한 CCD 카메라에는 확대 렌즈를 부착하였다. 가열 블록 케이스 ⑥은 외부 치수가 140 × 140 × 100 mm이다.

실험장치는 충돌속도에 따른 열전달 특성을 연구하기 위하여 충돌속도를 변화시킬 수 있도록 높이 조절이 가능하게 설치하여 Weber 수를 60, 180, 300으로 조절할 수 있게 하였다.

(unit : mm)

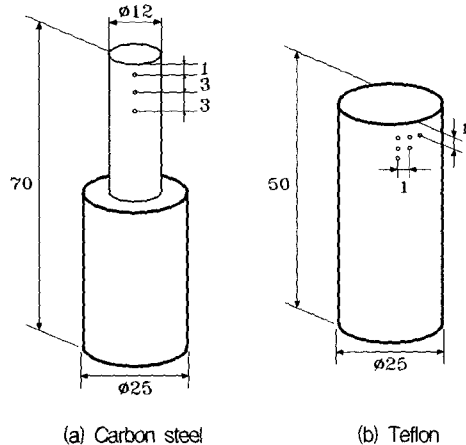


Fig. 2. Schematic diagram of heating element

Fig. 2 (a)는 가열고체로 사용된 탄소강의 형상과 열전대의 위치를 나타낸 그림으로 전체 길이를 70mm로 상부 직경이 12mm, 하부 직경이 25mm인 원통형으로 제작하였다. 열전대는 가열 고체의 표면으로부터 깊이 1mm, 4mm, 7mm에 각각 3개 부착하였으며 온도 제어용 열전대는 깊이 50mm에 1개 설치하였다. 테프론은 열전도도가 낮기 때문에 축대칭의 2차원 열전도를 고려하여 Fig. 2 (b)와 같이 전체 길이가 50mm이고 직경이 25mm인 원통형으로 하였다. 열전대는 중심축에서 깊이방향으로 1mm간격으로 3개를 심고, 중심축에서 깊이방향으로 1mm씩 떨

어진 곳에 깊이 방향으로 1개씩 덜 심어 총 6개를 심었다. 가열 고체를 가열하기 위한 히터는 240V, 200W인 밴드형을 사용하였다. 가열 고체인 탄소강 표면은 # 2000 사포로 연마한 후에 10 μ m의 크롬을 도금하였으나 테프론의 경우는 # 2000 사포로만 연마하였다.

2.2. 실험 방법 및 범위

주위의 온도는 25 \pm 0.5 $^{\circ}$ C로 설정하였고, 액적의 온도는 25 \pm 0.25 $^{\circ}$ C로 하였다. 증발시 고체 표면에서 물이 완전히 증발할 때까지의 증발액적의 열 물성치는 Cengel⁹⁾의 자료를 이용하였다. 실험에 사용한 순수한 물은 증류수를 100 $^{\circ}$ C까지 가열하여 물 속의 기체를 제거한 후 사용하였다. 또한 실험동안 온도 변화를 열전대를 통하여 측정하고, 시간에 따른 변화는 CCD 카메라를 이용하여 기록하였다.

액적의 직경은 표면에 떨어질 때를 촬영하여 측정하고 이를 보정하기 위하여 각각 50방울 및 100방울을 모아 무게를 측정하였다. 측정결과 \pm 3% 이내로 매우 잘 일치하였다.

본 실험에서 측정된 온도의 불확실도는 \pm 0.25 $^{\circ}$ C이고, 제어되는 히터의 온도는 \pm 0.2 $^{\circ}$ C이다. 길이의 측정에 대한 불확실도는 \pm 0.25mm정도이고, 질량의 불확실도는 \pm 0.0001g이다. 시간의 불확실도는 CCD 카메라의 기본 측정 시간인 1/30s이고, 최대오차는 0.17%로 나타났다. 화상 데이터의 불확실도는 \pm 7 μ m로 나타났다. 또한 온도와 증발시 부터 계산된 증발 열유속은 최대 \pm 9%로 나타났다.

Table 1에 액적 실험의 변수와 범위를 요약하여 나타내었다.

Table 1. Parameters and experimental ranges for droplet experiments

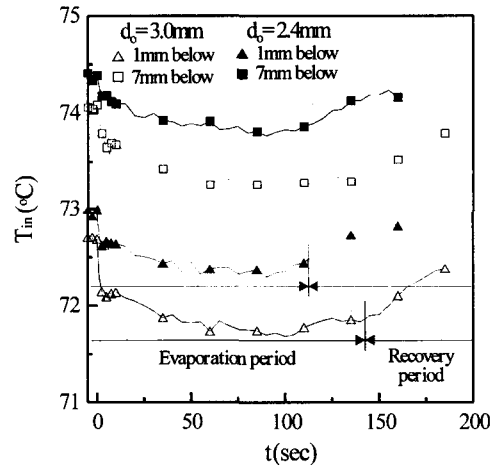
Surrounding & initial droplet temperature	Surrounding : 25 \pm 0.5 $^{\circ}$ C Initial droplet : 25 \pm 0.25 $^{\circ}$ C
Surface temperature	72.5 $^{\circ}$ C ~ 106.1 $^{\circ}$ C
Surface material	Carbon steel, Teflon
Droplet diameter	2.4 mm, 3.0 mm
Weber number	60, 180, 300

3. 실험결과 및 고찰

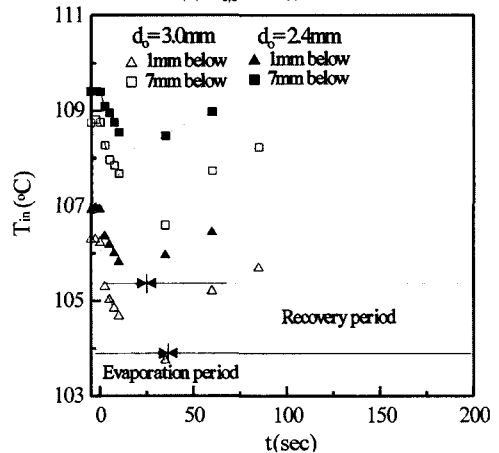
Fig. 3은 액적의 지름이 3.0mm와 2.4mm이고 Weber 수가 60일 때, 액적 부착 후 시간(t)의 경과에

따른 깊이방향 온도 변화(Indepth temperature: T_{in})를 나타낸 그림이다.

Fig. 3 (a)는 가열고체 표면의 초기 온도가 72.5 $^{\circ}$ C 일 때를 나타낸 그림으로 고체 내부의 온도는 액적 부착시 급격히 하강한 후, 서서히 감소하여 최소값에 도달한 후 증가하여 가열 고체 표면의 초기 온도로 회복되고 있다. 급격한 온도감소가 발생하는 구간은 액적이 부착 후 고체 표면이 액적에 의하여 냉각되어 나타나는 현상이며 이후 액적에 의하여 고체 표면은 지속적으로 냉각되어 최소값을 나타낸다. 다시 온도가 상승하는 것은 액적의 증발이 거의 완료되어 액적에 의한 냉각 효과는 없어지고 주위 고체로부터의 전도열전달로 인하여 표면 온도가 상승하기 때문이다.



(a) $T_{s,0} = 72.5^{\circ}$ C



(b) $T_{s,0} = 106.1^{\circ}$ C

Fig. 3. Indepth temperature variation of steel versus time for We=60

액적의 지름이 3.0mm 인 경우가 2.4mm 인 경우보다 낮은 온도를 나타내며 이는 액적의 물함유량이 많기 때문에 고체 표면에서의 냉각이 다소 많이 일어나기 때문이다. 따라서 고체내부의 온도하강이 조금 더 일어난다.

Fig. 3 (b)는 가열고체 표면의 초기 온도가 106.1℃일 때를 나타낸 그림으로 전반적인 경향은 앞의 경우와 유사하지만, 초기 고체 내부온도는 급격히 감소하고 증발시간과 회복시간이 매우 단축되었다.

이는 액적의 온도와 고체의 표면온도와의 차가 커져서 열전달이 더 크게 일어나기 때문이다. 또한 액적의 증발시간과 회복시간이 매우 짧아짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 액적의 지름이 3.0mm이고 Weber 수가 60, 180, 300일 때, 고체 표면으로부터 깊이 1.0mm 인 지점에서 액적 부착 전의 초기 온도와 시간의 경과에 따라 변화하는 온도($T_{i,0}$) 와의 차 $\Delta T(=T_i-T_{i,0})$ 를 나타낸 것이다.

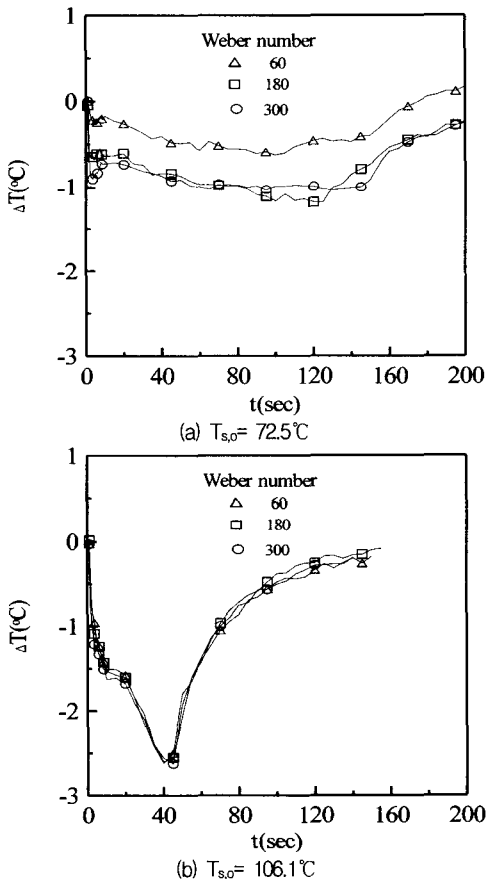


Fig. 4. 1.0mm below temperature difference with time on steel for various Weber number, $d_0=3.0\text{mm}$

Fig. 4 (a)는 가열고체 표면의 초기 온도가 72.5℃일 때를 나타낸 그림으로 액적 부착후 시간이 경과함에 따라 온도는 급격히 감소한 후 냉각곡선의 기울기가 매우 완만한 변화를 나타내고 있다. 또한 Weber 수가 증가함에 따라서 고체 내부의 온도하강은 조금 더 크게 일어나고 있다. 이는 Weber 수가 증가할수록 액적의 부착초기에 접촉면적이 확대되어 순간적인 전열면적이 증가하여 고체표면이 급속히 냉각되기 때문이다.

Fig. 4 (b)는 가열고체 표면의 초기 온도가 106.1℃일 때를 나타낸 그림으로 고체 표면의 온도가 증가함에 따라 열전달이 활발히 일어나서 온도하강이 크게 일어나며 Weber 수에 따른 영향이 조금 작게 나타난다.

Fig. 5는 액적 직경이 3.0mm일 때, 가열 고체 표면의 초기 온도($T_{s,0}$)에 대한 증발기간 동안의 시간 평균 열유속(time-average heating flux, q)을 나타낸 실험결과이다.

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

$$q = (2d_0 \rho_l \lambda') / (3t_i) \tag{1}$$

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

전반적으로 초기 고체표면 온도가 증가할수록 시간 평균 열유속은 지수적으로 증가하며, Weber 수가 증가할수록 시간 평균 열유속이 크게 나타난다. 이는 Weber 수가 클수록 초기 액적의 부착면적이 증가하여 순간적인 열전달이 활발히 일어나기 때문이다. 또한 고체표면의 온도가 상대적으로 낮을 때는 Weber 수의 영향이 작게 나타나며, 온도가 높을수록 열유속 차이가 조금 크게 나타난다.

탄소강의 시간 평균 열유속이 테프론보다 높게 나타나고 있다.

이는 탄소강의 열전도도가 크기 때문에 고체로부터 액적으로 전달되는 단위시간당 열량이 많기 때문이다.

Fig. 6은 액적직경이 3.0mm일 때, 초기 표면온도 ($T_{s,0}$)에 따른 전체 증발에 걸리는 시간(Evaporation time, t_i)을 나타낸 그림이다.

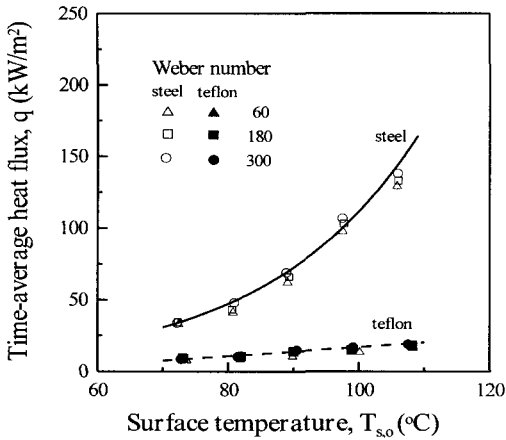


Fig. 5. Time-average heat flux with initial surface temperature, $d_0=3.0\text{mm}$

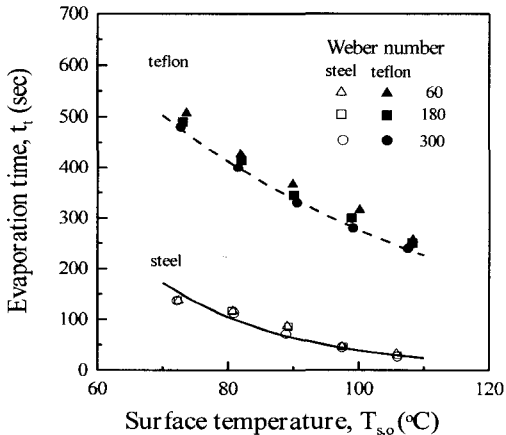


Fig. 6. Evaporation time with initial surface temperature, $d_0=3.0\text{mm}$

본 연구에서 정의된 결보기 증발시간(t_e)은 액적이 부착된 후 액적이 증발하는 동안 촬영된 영상 자료로부터 수분이 완전히 증발하여 외부에 물의 흔적이 완전히 없어지는 상태까지 측정된 값으로 정의하였다.

초기 고체표면 온도가 증가할수록 증발시간은 감소하며, Weber 수가 증가할수록 증발시간은 작게 나타난다.

4. 결론

본 연구에서는 액적의 Weber 수 변화에 따른 냉각 특성을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동일 고체표면온도에서 Weber 수가 클수록 액적에 의한 냉각효과는 크게 나타난다. 즉 액적의 충돌속도가 증가할수록 냉각효과가 증가함을 나타낸다.

2) 시간 평균 열유속은 고체재질에 관계없이 초기 고체표면 온도가 증가할수록 증가하며, Weber 수가 증가할수록 시간 평균 열유속이 크게 나타난다.

3) 증발시간은 고체재질에 관계없이 초기 고체표면 온도가 증가할수록 감소하며, Weber 수가 증가할수록 증발시간은 작게 나타난다.

4) 열전도도가 큰 탄소강이 테프론 보다 시간 평균 열유속은 크게, 증발시간은 작게 나타났다.

참고문헌

- 1) DiMarzo M., Evans D. D., "Evaporation of a Water Droplet Deposited on a Hot High Thermal Conductivity Surface," J. of Heat Transfer, Vol.111, 210-213, 1989.
- 2) Klassen, M., DiMarzo, M., "Transient Cooling of a Hot Surface by Droplets Evaporation," NIST-GCR 90-575, 1990.
- 3) Abu-Zaid, M., Atreya, A., "Transient Cooling of Hot Porous and Nonporous Ceramic Solids by Droplet Evaporation," J of Heat Transfer, Vol. 116, pp. 694~701, 1994.
- 4) 유갑중, 방창훈, 김정수, "가열된 고체표면에 부착된 단일액적의 증발냉각," 대한기계학회논문집 B권, 제25권, 제6호, pp. 845~852, 2001.
- 5) Benardin, J. D., "Leidenfrost Point and Film Boiling Heat Transfer of Single Droplets and Sprays," A Thesis of Ph. D, 1996.
- 6) L. H. J. Wachters and N. A. J. Westerling, "The Heat transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in the Spheroidal State," Chemical Engineering Science, Vol. 21, pp. 1047~1056, 1966.
- 7) F. Akao, J. Araki, S. Mori and A. Moriyama, "Deformation Behaviors of a Liquid Droplet Impinging onto Hot Metal Surface," Transactions ISIJ, Vol. 20, pp. 737~743, 1980.
- 8) Y. S. Ko and S. H. Chung, "An Experiment on the Breakup of Impinging Droplets on a Hot Surface," Experiments in Fluids, pp. 118~123, 1996.
- 9) Cengel Y. A., Boles M. A., Thermodynamics, McGraw-Hill, Int. ed, 1994.