

액적의 리바운드 모션에 주목한 분무냉각 막비등 열전달 모델

김 영 찬[†]

Film Boiling Heat Transfer Model of Spray Cooling Focusing on Rebound Motion of Droplets

Yeung Chan Kim

Key Words : Spray cooling (분무냉각), Heat transfer (열전달), Film boiling (막비등), Rebound motion (충돌거동), Sensible heat (현열), Dilute spray (희박분무)

Abstract

In this report, the heat transfer model of spray cooling on hot surface was developed by focusing on the effect of rebound motion of droplets. In the model, it was assumed that droplets rebound repeatedly on the hot surface and heat transfer upon droplet impact is proportional to sensible heat which heats up the droplets to the saturation temperature. In addition, to take account of the contribution of the heat flux upon impact of rebound droplets, it was assumed that the rebound droplets are distributed following the Gaussian distribution from 0 to L , which distance L is determined by maximum flight distance L_{max} . Also the calculated results were compared with existing experimental results.

기호설명

a, b, C	상수
c_p	액적의 비열 [J/kg°C]
d_l	액적의 직경 [m]
D_X	X 에서의 국소 액적유량밀도 [$m^3/(m^2s)$]
D_{max}	분무중심에서의 액적유량밀도 [$m^3/(m^2s)$]
$D_X[j]$	j 회째 충돌하는 액적유량밀도 [$m^3/(m^2s)$]
$D_X[j]^*$	무차원 액적유량밀도, $D_X[j] / D_{max}$
h_a	대류 열전달계수 [$W/m^2°C$]
j	액적의 리바운드 횟수
L_{max}	액적의 최대 비행거리 [m]
L_{max}^*	무차원 최대 비행거리, L_{max}/b

L	X 방향 거리 [m]
L^*	X 방향 무차원 거리, L/b
q_w	국소 열유속 [W/m^2]
q_l	액적의 충돌에 의한 열유속 [W/m^2]
q_a	기류에 의한 열유속 [W/m^2]
q_r	복사 열유속 [W/m^2]
$q_{dx}[j]$	j 회째 충돌하는 액적에 의한 열유속
$Q[j]$	액적으로의 전열량 [J]
T_a	주위 공기온도 [°C]
T_d	액적의 온도 [°C]
T_w	냉각면의 표면온도 [°C]
V_d	액적의 충돌속도 [m]
x	분무중심에서의 거리 [mm]
X	분무중심에서의 무차원 거리, x/b
ΔT_{sub}	액적의 과냉도, $T_{sat} - T_d$
ρ	액적의 밀도 [kg/m^3]
σ_l	액적의 표면장력 [N/m^2]

[†] 안동대학교 기계공학부

E-mail : yeung @ andong.ac.kr

TEL : (054)820-6013 FAX : (054)820-5092

1. 서론

다양한 분무조건에서 분무냉각 열전달을 예측하기 위해 Toda⁽¹⁻²⁾, Bolle and Moureau⁽³⁾, Deb and Yao⁽⁴⁾, Ito et al.⁽⁵⁾, Nishio and Kim⁽⁶⁾ 등의 많은 연구자들이 실험 및 해석적 연구를 수행하여 그 결과를 보고하였다. 특히 Nishio et al.⁽⁶⁾의 연구에서는 액적의 운동에너지가 비교적 크고 기류의 속도가 빠른 분무중심영역에서 분무액적은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 충돌→리바운드→재충돌의 동작을 반복하여 주변영역으로 이동하며, j 회 충돌직전의 과냉각도가 $\Delta T_{sub}[j]$ 인 단일 액적이 냉각면 표면에 충돌시의 열전달량 $Q[j]$ 는 액적의 온도가 포화온도까지 상승하는데 필요한 현열에 비례한다고 가정하여 분무냉각 열전달에 관한 아래와 같은 이론식을 유도하였다.

$$q_l = C [\rho c_p \Delta T_{sub}[1] \times \sum ((1-C)^{j-1} D_x[j])] \quad (1)$$

여기서 $D_x[j]$ 는 임의의 미소구간 Δx 에 $j (\geq 1)$ 회 충돌하는 분무액적의 유량밀도를 나타낸다. 그리고 계산을 간단히 하기 위해 3회 이상 충돌하는 액적에 의한 열전달을 무시하고 임의의 미소구간 Δx 에서 2회 충돌하는 액적의 유량밀도 $D_x[2]$ 를 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$D_x[2] = \frac{1}{L_{max}} \int_0^x D_x[1] dx \quad (2)$$

여기서 L_{max} 는 분무중심에서 리바운드에 의한 액적의 최대 비행거리를 나타내며, L_{max} 는 액적의 크기, 충돌속도 등에 거의 의존하지 않은 값이라고 가정하였다.

그러나 그들의 연구에서 충돌 후 액적의 최대 비행거리 L_{max} 를 액적의 크기, 기류의 속도 등과 같은 요인들에 영향을 받지 않는 것으로 가정하였을 뿐만 아니라, (2)식을 이용한 $D_x[2]$ 를 계산에 있어서도 $D_x[1]$ 의 분포가 상술한 요인들에 상관없이 x 방향으로 균일하게 분포하도록 가정한 점은 실제의 액적의 충돌거동과 많은 차이가 있는 것으로 판단된다. 또한 충돌액적에 의한 열전달의 계산에 있어서도 3회 이상 충돌하는 액적에 의한 열전달을 무시한 점에 대해서도 그 타당성을 검토할 필요가 있는 것으로 판단된다.

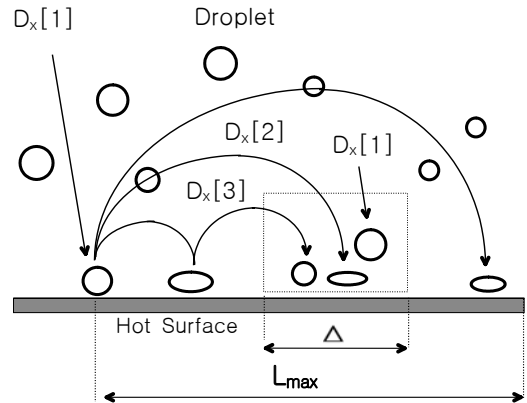


Fig. 1 Rebound motion of droplet on hot plate

본 연구에서는 리바운드에 의한 재충돌 액적의 분포를 Gaussian 분포를 이용하여 새롭게 가정하고 최대 비행거리 L_{max} 를 기류의 속도에 영향을 받는 값으로 설정하여 수정된 열전달 모델을 제시하였으며 열전달 모델에 의한 계산결과를 실험결과와 비교하였다.

2. 열전달 모델 개요

2-1 열전달 모델 조건 및 가정

열전달 모델의 기본적인 가정 및 조건은 Nishio et al.⁽⁶⁾의 연구와 동일하며 (1)식의 유도과정을 간략히 소개하기로 한다. 본 모델은 ①고온의 수평 냉각면에 과냉각도가 큰 액적이 충돌하며 ②액적이 냉각면에 충돌하기 전에 서로 간섭하거나 충돌 후 액적이 합체하여 냉각면상에 액막을 형성하지 않는 비교적 희박한 분무조건이다. 또한 열전달 모델링을 위해 아래와 같은 가정을 하였다.

(1) 임의의 미소구간 Δx 에서의 국소 분무냉각 열전달 q_w 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$q_w = q_l + q_a + q_r \quad (3)$$

$$q_a = h_a (T_w - T_a), \quad q_r = \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_a^4) \quad (4)$$

(2) 액적의 운동에너지가 비교적 크고 기류의 속도가 빠른 분무중심영역에서 액적은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 충돌→리바운드→재충돌의 동작을 반복하여 주변영역으로 이동한다. 이때에 임의의 미소구간 Δx 에서 충돌액적에 의한 열유속 $q[x]$ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$q[x] = q_{dx}[1] + q_{dx}[2] + q_{dx}[3] + q_{dx}[4] + \dots \quad (5)$$

여기서 $q_{dx}[j]$ 는 j 회째 충돌하는 액적군에 의한 열유속을 나타낸다.

(3) j 회째 충돌직전의 과냉각도가 $\Delta T_{sub}[j]$ 인 단일 액적이 냉각면 표면에 충돌시의 열전달량 $Q[j]$ 는 액적의 온도가 포화온도까지 상승하는데 필요한 현열에 비례한다고 가정하여 다음의 식으로 나타낸다.

$$Q[j] = C \rho c_p (\pi d_i^3 / 6) \Delta T_{sub}[j] \quad (6)$$

여기서 C 는 비례상수로서 Weber 수 ($= \rho d_i V_a / \sigma$)와 Peclet 수 ($= d_i V_a / a$)의 함수라고 생각되지만 본 연구에서는 Shoji et al.⁽⁷⁾의 실험결과에 기초하여 비교적 과냉각도가 큰 액적의 경우에는 액적의 속도, 크기 등에 영향을 거의 받지 않는 일정한 값으로 가정하였다. 참고로 Shoji et al.은 크기와 속도가 서로 다른 단일 액적으로 대상으로 한 열전달 실험과 Nishio et al.⁽⁶⁾의 분무냉각 열전달 실험을 통하여 $C \approx 0.5$ 의 값을 얻을 수 있었다. 또한 (6)식은 1회째 충돌하기 직전의 액적의 과냉각도 $\Delta T_{sub}[1]$ 을 이용하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q[j] = C (1-C)^{j-1} \rho c_p (\pi d_i^3 / 6) \Delta T_{sub}[1] \quad (7)$$

Fig. 1에 나타낸 미소구간 Δx 에 단위 시간당 j 회째 충돌하는 액적의 개수를 $n_x[j]$ 라고 두면 (5)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q[x] = (\sum Q[j] \times n_x[j]) / \Delta x \quad (8)$$

(8)식에 (7)식을 대입하면 (1)식과 같은 분무냉각 열전달에 관한 이론식을 얻을 수 있다.

2-2 분무냉각 열전달의 구체적 계산방법

만약 앞서 언급한 바와 같이 기존의 연구결과를 인용하여 $C \approx 0.5$ 인 경우 (7)식으로부터 $Q[3] = 0.25 Q[1]$, $Q[4] = 0.125 Q[1]$ 의 관계를 유도할 수 있다. 이 관계식들로부터 알 수 있듯이 3회, 4회째 충돌하는 액적의 열전달은 각각 처음 충돌하는 액적에 의한 열전달의 약 25%, 12.5% 정도이며 이는 충돌횟수가 증가할수록 액적의 과냉각도가 감소하여 열전달이 감소하고 있음을 나타낸다. 또한 (1)식을 이용하여 분무냉각 열전달을 계

산하기 위해서는 유량밀도 $D_X[j]$ 의 분포에 대한 평가가 필요하며 본 연구에서는 아래와 같은 방법을 이용하여 $D_X[j]$ 의 분포를 계산하였다. 일반적으로 무차원 유량밀도 $D_X[1]^*$ 는 아래와 같은 분포식으로 나타낼 수 있다.

$$D_X[1]^* = \exp[-a \cdot X^f] \quad (9)$$

여기서 무차원 유량밀도 $D_X[1]^* = D_X[1] / D_{max}$, 무차원 거리 $X = x/b$ 로 정의한다. a 및 f 는 분무노즐의 종류에 따라 정해지는 상수이며 2 유체노즐(twin fluid nozzle)을 이용한 Kim⁽¹²⁾의 실험결과에서는 $a = 0.693$, $f = 1.5$ 의 값을 얻을 수 있었다. 즉 $D_X[1]^*$ 에 대한 분포는 실험을 통하여 결정할 수 있는 값으로 한다. 다음으로 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 임의의 구간 $0 \sim X$ 에 처음 충돌하는 액적 유량 $D_X[1]^*$ 은 리바운드에 의해 $0 \sim L^*$ 구간에 걸쳐 재충돌한다고 가정한다. 이 경우 재충돌 액적 유량 $D_X[2]^* (= D_X[2] / D_{max})$ 의 X 방향 분포는 액적의 사이즈 분포식과 유사한 아래의 분포식으로 나타낼 수 있는 것으로 가정한다.

$$D_X[2]^* = B_2(X) \cdot \exp[-a_2(X | X - (L^*/2) |^f)] \quad (10)$$

여기서 $B_j(X)$, $a_j(X)$ 는 충돌횟수 j 및 Fig. 2에서 적분구간 X 의 함수이다. L^* 는 X 방향 무차원 거리이며, 액적의 충돌구간 X 와 충돌구간에서 최대로 비행할 수 있는 무차원 거리 $L_{max}^* (= L_{max} / b)$ 의 합($L^* = X + L_{max}^*$)으로 나타낼 수 있다.

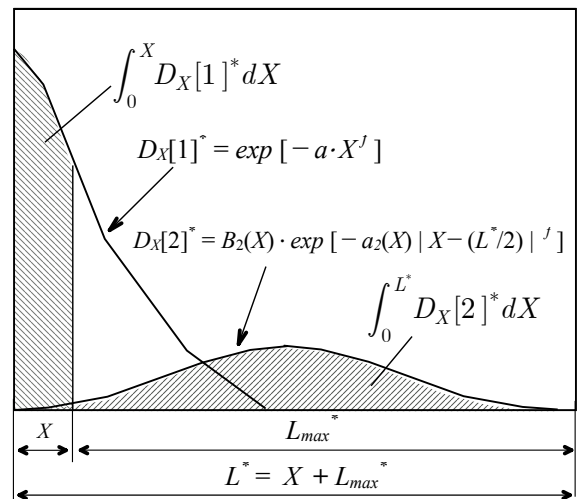


Fig. 2 Distributions of $D_X[1]^*$ and $D_X[2]^*$

단 L_{max}^* 는 액적의 크기, 기류의 속도 등의 요인에 영향을 받는 값으로 가정한다. 즉 임의의 구간에 처음 충돌한 액적군의 사이즈는 Gaussian 분포를 가지며, 액적의 X방향 비행거리는 액적의 크기에 영향을 받아 재충돌 액적의 분포는 $0 \sim L^*$ 구간에 걸쳐 (10)식과 같은 분포를 가지는 것으로 한다. 또한 $j \geq 2$ 인 모든 $D_x[j]^*(=D_x[j]/D_{max})$ 에 대해서 아래와 같은 유사한 식을 얻을 수 있다.

$$D_x[j]^* = B_j(X) \cdot \exp[-a_j(X) |X - (L^*/2)|^f] \quad (11)$$

$D_x[1]^*$, $D_x[2]^*$ 의 분포를 각각 (9), (10)식을 이용하여 나타낼 수 있고 또한 Fig. 1, 2에 나타낸 액적의 충돌거동을 가정할 경우 임의의 $0 \sim X$ 구간에 충돌하는 $D_x[1]^*$ 의 적분값은 $0 \sim L^*$ 구간의 $D_x[2]^*$ 의 적분값과 같아 다음의 식이 성립한다.

$$\int_0^X D_x[1]^* dX = \int_0^{L^*} D_x[2]^* dX \quad (12)$$

(9), (10)식을 (12)식에 대입하면 다음의 식을 이용하여 $B_j(X)$ 를 구할 수 있다.

$$B_2(X) = \frac{\int_0^X \exp[-a X^f] dX}{\int_0^{L^*} \exp[-a_2(X) |X - (L^*/2)|^f] dX} \quad (13)$$

$j \geq 2$ 인 모든 $D_x[j]^*$ 에 대해서도 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$\int_0^X D_x[j]^* dX = \int_0^{L^*} D_x[j+1]^* dX \quad (14)$$

마찬가지로 (11)식을 (14)식에 대입하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$B_j(X) = \frac{\int_0^X \exp[-a_j(X) |X - (L^*/2)|^f] dX}{\int_0^{L^*} \exp[-a_{j+1}(X) |X - (L^*/2)|^f] dX} \quad (15)$$

(9)식의 D_{max} , a , f , b 는 실험적 방법으로 구할 수 있으며 만약 $a_j(X)$ 를 알 수 있다면 $B_j(X)$ 를 구할 수 있으므로 최종적으로 (10)식으로부터 $D_x[2]^*$ 의 분포를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 분무중심 ($X=0$)에서 $D_x[j]$ 는 D_{max} 에 비하여 매우 작을 것으로 판단되며

본 연구에서는 $j \geq 2$ 에 대해서 $D_x[j]^* = D_x[j]/D_{max} \approx 0$ 의 관계를 이용하여 $a_j(X)$ 를 추정하였다

이와 같이 $D_x[j \geq 2]^*$ 를 평가함에 있어서 (13)식과 같은 분포식을 이용함으로써 액적의 사이즈 분포, 기류의 속도 등의 요인들이 실제의 액적의 충돌거동에 가깝게 반영될 수 있을 것으로 판단된다.

3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 주로 Kim⁽⁸⁾의 실험결과에서 얻은 (9)식의 $a=0.693$, $f=1.5$ 의 값을 중심으로 열전달 모델 계산을 수행하였다. Fig. 3에는 무차원 열유속 $q_{dx}[j]^*$ 의 분포의 계산결과를 나타내었으며 $q_{dx}[j]^*$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$q_{dx}[1]^* = q_{dx}[1]/q_{max} = D_x[1]/D_{max}, j=1$$

$$q_{dx}[j]^* = q_{dx}[j]/q_{max} = (1-C)^{j-1} D_x[j]/D_{max}, j \geq 2 \quad (16)$$

여기서 q_{max} 는 분무중심 ($X=0$)에서 첫 번째 충돌하는 분무액적의 유량밀도 $D_x[1]$ 에 의한 최대 열유속을 나타낸다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 무차원 거리 X 가 증가함에 따라 $q_{dx}[1]^*$ 는 $D_x[1]^*$ 에 비례하여 감소하지만 $q_{dx}[2]^*$, $q_{dx}[3]^*$ 의는 점차 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있다.

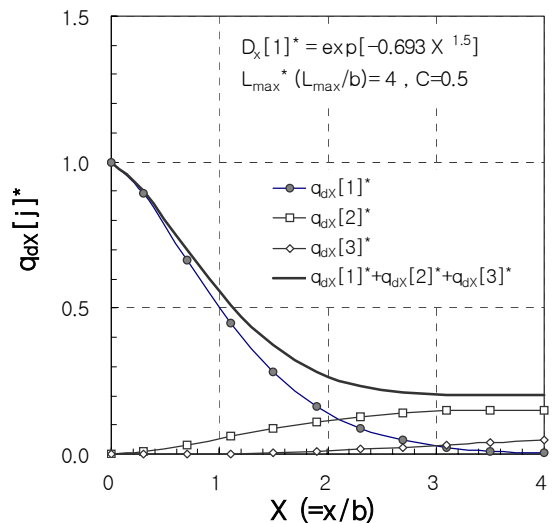


Fig. 3 Calculated results of $q_{dx}[j]^*$

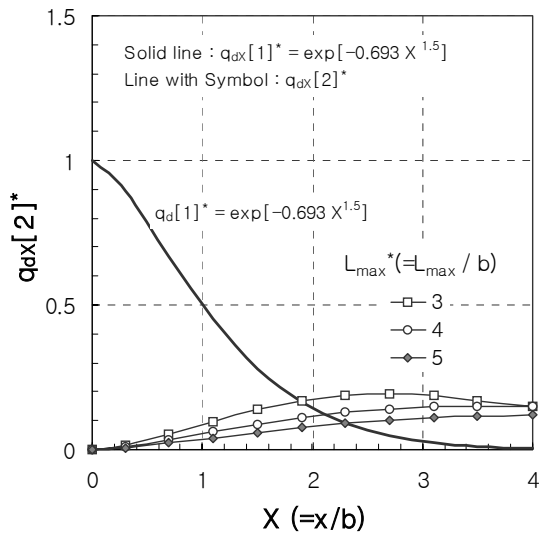


Fig. 4 Calculated results of $q_{ax}[2]^*$

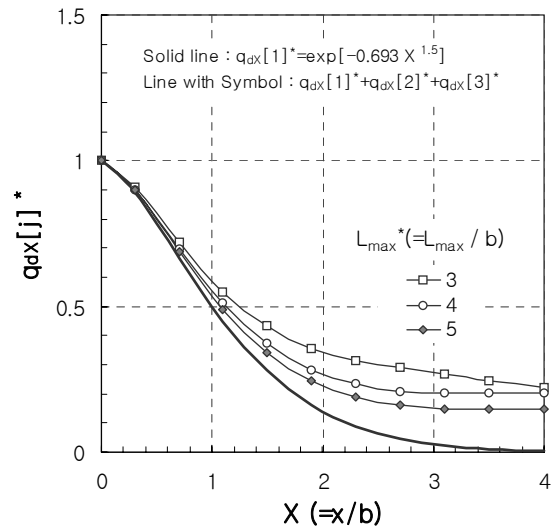


Fig. 6 Calculated results of $q_{ax}[j]^*$

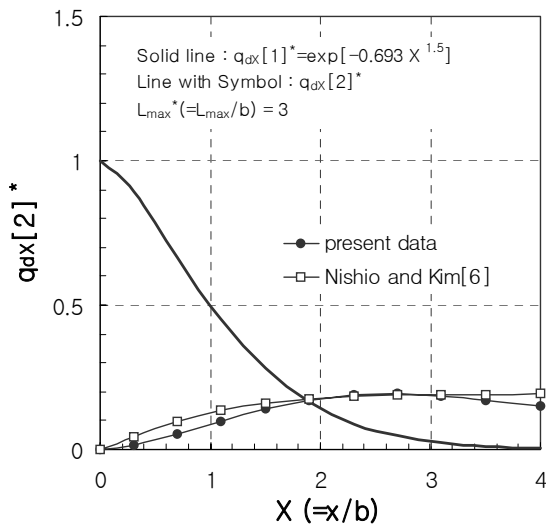


Fig. 5 Comparison of calculated results

그림으로부터 $q_{ax}[2]^*$, $q_{ax}[3]^*$ 의 경우 액적의 충돌횟수가 증가할수록 과냉각도가 감소하여 (1)식에 나타낸 $(1-C)^{j-1}$ 에 비례하여 그 값이 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 계산결과로부터 알 수 있듯이 $q_{ax}[3]^*$ 의 값은 비교적 작으며 이보다 충돌횟수가 많은 $j \geq 4$ 인 액적에 의한 $q_{ax}[j]^*$ 는 거의 무시할 수 있는 값으로 판단된다.

Fig. 4에는 L_{max}^* 를 파라미터로 하여 $q_{ax}[2]^*$ 의 계산결과를 나타내었다. 액적의 최대비행거리는 액적의 크기, 기류의 속도 등에 영향을 받는 값이며 계산결과로부터 알 수 있듯이 L_{max}^* 가 증가할수록 $q_{ax}[2]^*$ 는 감소하고 있음을 알 수 있다.

이는 L_{max}^* 가 증가할수록 재충돌 구간 ($0 \sim L^*$)이

더욱 커져 $D_x[2]^*$ 가 감소하기 때문으로 생각된다.

Fig. 5에는 Nishio et al.의 연구에서 제안한 (2)식을 이용하여 $q_{ax}[2]^*$ 를 계산한 결과를 본 연구의 계산결과와 함께 나타내었다. 단 Nishio et al.의 계산결과는 $X \leq L_{max}^*$ 의 조건에서만 성립된다. 그림으로부터 $L_{max}^* = 3$ 인 경우 본 연구의 재충돌 모델을 이용하여 계산한 $q_{ax}[2]^*$ 가 약간 작게 나타나고 있으나 그 차이는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 다만 Nishio et al.의 연구에서는 $D_x[2]$ 의 재충돌 구간을 $0 \sim L_{max}^*$ 로 설정하였지만 본 연구에서는 액적의 초기 충돌위치를 고려한 $0 \sim L^*$ ($=X+L_{max}^*$)로 가정함으로써 액적의 재충돌 거동을 좀더 실제에 가깝도록 설정하였다. 이러한 차이로부터 동일한 L_{max}^* 에 대해서도 $D_x[2]$ 의 재충돌 구간이 Nishio et al.의 경우보다 본 연구의 경우가 훨씬 길어지게 되는 효과가 발생하며 이 때문에 $q_{ax}[2]^*$ 도 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 충돌액적에 의한 전체 열유속 q_i^* ($=q_{ax}[1]^* + q_{ax}[2]^* + q_{ax}[3]^*$)를 계산하여 그 분포를 나타내었으며 그림에서 알 수 있듯이 L_{max}^* 가 증가할수록 q_i^* 는 점차 감소하고 있다.

4. 실험결과와의 비교

Fig. 7에는 본 열전달 모델을 이용한 계산결과와 기존의 실험결과⁽⁸⁾를 비교하였다. 열전달 모델을 이용한 계산에는 $C=0.5$, $L_{max}^*=3$ 의 값을 이용하였으며 실험값에는 $a=0.693$, $f=1.5$ 이며 D_{max} =

0.00079 ~ 0.00298 m³/(m²s), $V_d = 7 \sim 20$ m/s의 범위인 비교적 희박 분무영역을 대상으로 한 실험결과를 인용하였다. 실험에 사용한 2 유체 편평노즐 (twin fluid flat nozzle)은 액압을 일정하게 유지한 상태에서 공기의 압력을 증가시키면 분무각이 커져 상수 b 는 증가하고 D_{max} 의 값은 감소하지만, 공기압의 증가로 인해 기류의 속도가 급격히 증가하는 분무특성을 가지고 있다⁽⁸⁾. Fig. 9로부터 알 수 있듯이 실험결과는 $L_{max}^* \approx 3$ 인 경우의 계산결과와 비교적 잘 일치하고 있으며, $L_{max}^* \approx 3$ 으로 거의 일정할 경우 L_{max} 는 b 가 증가할수록 커지게 된다. 이러한 사실로부터 알 수 있듯이 그림에 나타난 실험결과는 D_{max} 가 감소할수록 L_{max} 는 증가하는 경향이 있음을 나타내고 있으며, 이는 앞서 설명한 바와 같이 분무노즐의 공기압이 증가할수록 D_{max} 는 감소하지만 b 가 증가하는 분무각이 큰 형태의 분무가 이루어지며 이로 인해 기류의 속도가 증가해 L_{max} 가 증가하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 막비등 영역에서 액적의 리바운드 모션에 주목한 분무냉각 열전달 모델에 대해 고찰하였다. 특히 리바운드에 의한 재충돌 액적은 재충돌 구간 $0 \sim L^*$ 에서 (13)식과 같은 Gaussian 분포를 가지며 L^* 는 액적의 최대비행거리 L_{max}^* 에 의해 결정되는 것으로 가정하였다. 이러한 재충돌 액적분포의 설정은 액적의 사이즈 분포, 기류의 속도를 고려한 것으로 기존의 연구와는 다르게 액적의 충돌거동을 한층 실제상황에 가깝게 표현할 수 있는 것으로 생각된다. 실험결과와의 비교에 있어서도 $C=0.5$, $L_{max}^* \approx 3$ 을 채용한 열전달 모델의 계산결과는 2 유체 편평노즐을 이용한 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 비교결과로부터 2 유체노즐의 공기압력이 증가할 경우 기류의 속도가 증가함으로 인해 L_{max} 도 점차 증가하는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지역대학 우수과학자 연구지원(2003-000-11333-0)으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

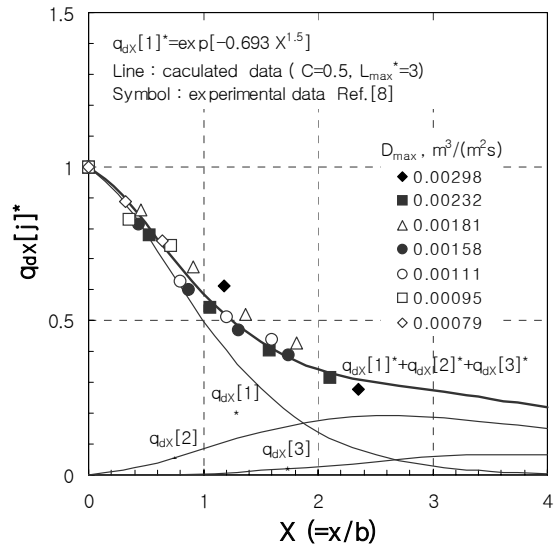


Fig. 7 Comparison between experimental and calculated results for 2 dimensional spray

참고문헌

- (1) Toda, S, 1972, A Study of Mist Cooling (1st Report : Investigation of Mist Cooling), Heat Transfer Japanese Research, Vol. 1, pp. 39-52
- (2) Toda, S, 1974, A Study of Mist Cooling (2nd Report : Theory of Mist Cooling and its Fundamental Experiments), Heat Transfer Japanese Research, Vol. 3, pp. 1-44
- (3) Bolle, L. and Moureau, J.C., 1977, Spray Cooling of Hot Surface, Two-Phase Flow and Heat Transfer Proc. NATO Advanced Study Institute, Vol. 3, pp. 1327-1346
- (4) Deb, S. and Yao, S.C., 1989, Analysis on Film Boiling Heat Transfer of Impacting Sprays, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, pp. 2099-2111
- (5) Ito, T., Takata, Y. and Mousa, M.M., 1992, Study on the Water Cooling of Hot Surface (Analysis of Spray Cooling in the Region Associated with Film Boiling), JSME Int. J. Series 2, pp. 589-597
- (6) Nishio, S. and Kim, Y. C., 1998, Heat Transfer of Dilute Spray Impinging on Hot Surface, Int. J. of Heat & Mass Transfer, vol.41, pp. 4113-4119.
- (7) Shoji, S, Wakunaga, T. and Kodama, K., 1984, Heat Transfer between Hot Surface and Impinging Subcooled Droplet, Trans. JSME, Vol. 50(B), pp. 716-723
- (8) Kim, Y. C., 2004, Study on Film Boiling Heat Transfer of Spray Cooling in Dilute Spray Region, Proceeding of the KSME 2004 Spring Annual Meeting, pp. 1481-1486