

< 기술논문 >

## 액적의 리바운드 모션에 주목한 분무냉각 막 비등 열전달 모델

김 영 찬\*

(2004년 9월 16일 접수, 2004년 12월 10일 심사완료)

### 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(막 비등), Rebound Motion(충돌거동), Sensible Heat(현열), Dilute Spray(희박분무)

#### Abstract

In the present study, to determine the flow rate of droplets supplied to heat transfer surface after  $(j-1)$ th rebound,  $D_x[j \geq 2]$ , it was assumed that the rebound droplets are distributed according to the Gaussian distribution from 0 to  $L$ , in which the flight distance  $L$  is determined by maximum flight distance  $L_{max}$ . We also assumed that  $L_{max}$  is dependent on the air flow velocity and mean size of droplets. The local heat flux of a dilute spray in high temperature region was predicted using the newly evaluated  $D_x[j \geq 2]$ . In addition, the predicted results by the present model were compared with the existing experimental data.

———— 기호설명 ————

$a, b, C$  : 상수  
 $c_p$  : 액적의 비열 [J/kg°C]  
 $d_l$  : 액적의 직경 [m]  
 $D_x$  :  $X$ 에서의 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,  $L_{max}/b$   
 $L$  : 액적의 재충돌 거리 [m]

$L^*$  : 액적의 무차원 재충돌 거리,  $L/b$   
 $q_w$  : 국소 열유속 [ $W/m^2$ ]  
 $q_l$  : 충돌액적에 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  
 $Q[j]$  :  $j$ 회째 충돌하는 액적의 전열량 [J]  
 $T_a$  : 주위 공기온도 [°C]  
 $T_d$  : 액적의 온도 [°C]  
 $T_{sat}$  : 액적의 포화 온도 [°C]  
 $T_w$  : 냉각면의 표면온도 [°C]  
 $V_a$  : 기류의 속도 [m/s]  
 $V_d$  : 액적의 충돌속도 [m/s]  
 $x$  : 분무중심에서의 거리 [mm]  
 $X$  : 분무중심에서의 무차원 거리,  $x/b$   
 $\Delta T_{sub}$  : 액적의 과냉도,  $T_{sat} - T_d$   
 $\rho$  : 액적의 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\sigma_l$  : 액적의 표면장력 [ $N/m^2$ ]

\* 회원, 안동대학교 기계공학부

E-mail : yeung @ andong.ac.kr

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

1. 서론

분무냉각 열전달에는 액적의 유량밀도, 크기, 온도, 충돌속도 등과 같은 많은 요인이 영향을 미칠 뿐만 아니라 액적이 냉각면에 충돌한 직후에 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 분열(split), 리바운드(rebound), 합체(coalescence) 등과 같이 다양한 형태의 거동을 나타내고 있어 이러한 요인들이 분무냉각 열전달의 정확한 예측을 매우 어렵게 만들고 있다. 현재까지 분무냉각 열전달에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 알려진 액적의 유량밀도를 비롯하여 액적의 크기, 온도, 충돌속도 등에 대한 많은 실험적 연구결과가 보고되었다.<sup>(1~4)</sup> 그리고 실험적 연구와 비교할 때 그리 많지는 않지만 Toda,<sup>(5-6)</sup> Bolle and Moureau,<sup>(7)</sup> Deb and Yao,<sup>(8)</sup> Ito et al.<sup>(9)</sup> 등의 연구자들이 다양한 조건에서 분무냉각 열전달을 예측하기 위한 해석적 연구를 수행하여 그 결과를 보고하였다. 그러나 이와 같은 많은 연구에도 불구하고 현재까지도 분무냉각 열전달의 메카니즘을 잘 이해하고 적용하는데 있어서 많은 어려움이 있으며, 분무냉각 열전달의 정확한 예측을 위해서는 액적의 유량밀도, 크기, 온도, 충돌속도 등과 같은 요인에 대한 연구뿐만 아니라 액적의 충돌전후의 거동에 대한 이해가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

Nishio and Kim<sup>(10)</sup>은 액적의 운동에너지가 비교적 크고 기류의 속도가 빠른 분무중심영역에서 액적은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 충돌→리바운드→재충돌의 동작을 반복하여 주변영역으로 이동하며,  $j$  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 분무냉각 열전달에 관한 아래와 같은 이론식을 유도하였다.

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

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

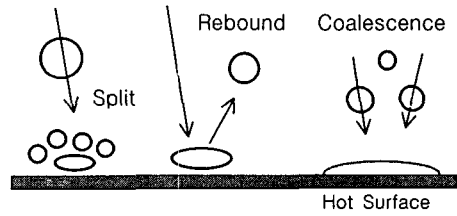


Fig. 1 Droplet behavior on hot plate

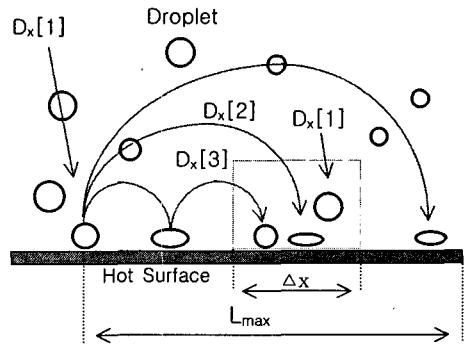


Fig. 2 Rebound motion of droplets on hot plate

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

여기서  $L_{max}$ 는 분무중심에서 리바운드에 의한 액적의 최대 비행거리를 나타내며,  $L_{max}$ 는 액적의 크기, 충돌속도 등에 거의 의존하지 않은 값이라고 가정하였다. 이와 같은 방법으로 Nishio et al.은 분무냉각 열전달 모델을 수립하였으며 해석결과를 실험결과와도 비교하여 비교적 잘 일치하고 있음을 보고하였다.

그러나 Nishio et al.의 연구에서는 충돌 후 액적의 최대 비행거리  $L_{max}$ 를 액적의 크기, 기류의 속도 등과 같은 요인들에 영향을 받지 않는 것으로 가정하였을 뿐만 아니라, 식 (2)를 이용한  $D_x[2]$ 를 계산에 있어서도  $D_x[2]$ 의 분포가 상술한 요인들에 상관없이  $x$ 방향으로 균일하게 나타나도록 가정한 점은 실제의 액적의 충돌거동과 다소 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.

본 연구에서는 리바운드에 의한 재충돌 액적의 분포와 최대 비행거리  $L_{max}$ 를 산출함에 있어서 액적의 크기, 기류의 속도 등의 요인을 고려함으로써 가능한 실제의 충돌거동과 유사한 조건에서의 액적에 의한 열전달 모델에 관한 연구를 수행하였다.

### 2. 열전달 모델 개요

본 모델은 ① 비등곡선에서 막 비등(film boiling) 영역에 해당하는 고온의 수평 냉각면에 비교적 과냉각도가 큰 액적이 충돌하며, ② 액적이 냉각면에 충돌하기 전에 서로 간섭하거나 충돌후 액적이 상호 합체하여 냉각면상에 액막을 형성하지 않는 비교적 희박한 분무조건을 대상으로 하였다. 그리고 열전달 모델링을 위해 아래와 같은 가정을 하고 관계식을 유도하였다.

(a) 임의의 미소구간  $\Delta x$ 에서의 국소 분무냉각 열유속  $q_w$ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$q_w = q_l + q_a + q_r \tag{3}$$

(b) 액적의 운동에너지가 비교적 큰 분무중심영역에서 액적은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 충돌→리바운드→재충돌의 동작을 반복하여 주변영역으로 이동한다. 그리고  $j$  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.

$$Q[j] = C \rho c_p (\pi d_i^3 / 6) \Delta T_{sub}[j] \tag{4}$$

또한 식 (4)는 처음 충돌하기 직전의 액적의 과냉각도  $\Delta T_{sub}[1]$ 을 이용하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q[j] = C(1-C)^{j-1} \rho c_p (\pi d_i^3 / 6) \Delta T_{sub}[1] \tag{5}$$

Fig. 2에 나타낸 미소구간  $\Delta x$ 에 단위 시간당  $j$  회째 충돌하는 액적의 개수를  $n_x[j]$ 라고 두면 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_l = (\sum Q[j] \times n_x[j]) / \Delta x \tag{6}$$

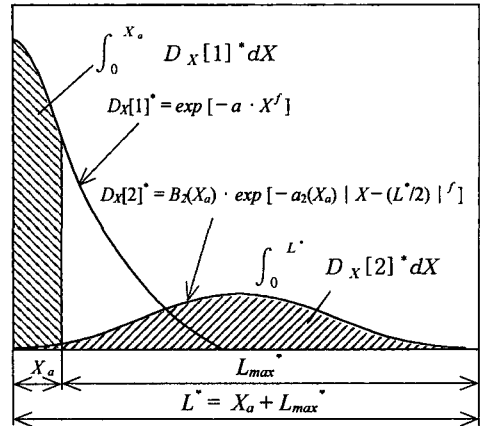


Fig. 3 Distributions of  $D_X[1]^*$  and  $D_X[2]^*$

식 (6)에 식 (5)를 대입하면 식 (1)과 같은 분무냉각 열전달에 관한 이론식을 얻을 수 있다. 식 (4), (5)의  $C$ 는 비례상수로서 Weber 수 ( $= \rho d_i V_d / \sigma$ )와 Peclet 수 ( $= d_i V_d / a$ )의 함수라고 생각되지만, 본 연구에서는 Shoji et al.<sup>(11)</sup>의 실험결과에 기초하여 비교적 과냉각도가 큰 액적의 경우에는 액적의 속도, 크기 등에 영향을 거의 받지 않는 일정한 값으로 가정하였다. 참고로 Shoji et al.의 크기와 속도가 서로 다른 액적으로 대상으로 한 열전달 실험과 Nishio et al.<sup>(10)</sup>의 분무냉각 열전달 실험에 있어서  $C \approx 0.5$ 의 값을 얻을 수 있었다. 만약 앞서 언급한 바와 같이 기존의 연구결과를 인용하여  $C \approx 0.5$ 를 이용할 경우 식 (5)에서  $Q[3] = 0.25 Q[1]$ ,  $Q[4] = 0.125 Q[1]$ 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.

(c) 임의의 구간에 충돌하는 액적은 액적군의 크기는 Gaussian 분포를 가지며 액적의  $X$ 방향 비행거리는 액적의 크기에 영향을 받아  $0 \sim L^*$ 구간에 걸쳐 Gaussian 분포를 가지며 재충돌하는 것으로 가정한다. 여기서  $L^*$ 는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 분무중심에서  $X$ 방향 거리이며, 분무액적의 충돌구간  $X_a$ 와 충돌구간에서 최대로 비행할 수 있는 무차원 거리  $L_{max}^* (= L_{max} / b)$ 의 합( $L^* = X_a +$

$L_{max}^*$ )으로 나타낼 수 있다. 단,  $L_{max}^*$ 는 액적의 평균직경, 기류의 속도 등의 요인에 영향을 받는 값으로 가정한다.

상술한 열전달 모델의 기본조건 및 가정 (a)와 (b)는 Nishio et al.<sup>(10)</sup>의 연구와 동일하며 가정 (c)는 본 연구에서 새롭게 제시되었다. 식 (1)을 이용하여 분무냉각 열전달을 계산하기 위해서는  $D_x[j]$ 의 분포에 대한 평가가 필요하며 본 연구에서는 아래와 같은 방법을 이용하여  $D_x[j]$ 의 분포를 계산하였다. 일반적으로  $D_x[1]^*$ 는 아래와 같은 Gaussian 분포식으로 나타낼 수 있다.

$$D_x[1]^* = \exp[-aX^f] \quad (7)$$

여기서 무차원 유량밀도  $D_x[1]^* = D_x[1]/D_{max}$ , 무차원 거리  $X = x/b$ 로 정의한다.  $D_{max}(=D_{max}[1])$ 는 분무중심에서의 액적유량밀도이다.  $a$  및  $f$ 는 분무노즐의 특성에 따라 정해지는 상수이며 2유체 편평 노즐(twin fluid flat spray nozzle)을 이용한 Kim<sup>(12)</sup>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. 3에 나타낸 바와 같이 가정 (c)로부터  $D_x[2]^*(=D_x[2]/D_{max})$ 의 X방향 분포는 아래의 분포식으로 나타낼 수 있다.

$$D_x[2]/D_{max}[2] = \exp[-a_f(X_a) |X - (L^*/2)|^f] \quad (8)$$

$$D_x[2]^* = B_2(X_a) \cdot \exp[-a_f(X_a) |X - (L^*/2)|^f] \quad (9)$$

여기서  $a_f(X_a)$ ,  $B_f(X_a)$ 는 층돌횟수  $j$ 와 Fig. 3에 나타낸 적분구간  $X_a$ 에 의해 정해지는 상수이다.  $j \geq 2$ 인 모든  $D_x[j]^*(=D_x[j]/D_{max})$ 에 대해서도 아래와 같은 유사한 식을 얻을 수 있다.

$$D_x[j]^* = B_j(X_a) \cdot \exp[-a_f(X_a) |X - (L^*/2)|^f] \quad (10)$$

$D_x[1]^*$ ,  $D_x[2]^*$ 의 분포를 각각 식 (7), (9)를 이용하여 나타낼 수 있고 또한 Fig. 2, 3에 나타낸 액적의 충돌거동을 가정할 경우 임의의  $0 \sim X_a$ 구간에 충돌하는  $D_x[1]^*$ 의 적분 값은  $0 \sim L^*$ 구간의  $D_x[2]^*$ 의 적분 값과 같아 다음의 식이 성립한다.

$$\int_0^{X_a} D_x[1]^* dX = \int_0^{L^*} D_x[2]^* dX \quad (11)$$

식 (7), (9)를 식 (11)에 대입하면 다음의 식을 이용하여 상수  $B_2(X_a)$ 를 구할 수 있다.

$$B_2(X_a) = \frac{\int_0^{X_a} \exp[-aX^f] dX}{\int_0^{L^*} \exp[-a_2(X_a) |X - (L^*/2)|^f] dX} \quad (12)$$

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

$$\int_0^{X_a} D_x[j]^* dX = \int_0^{L^*} D_x[j+1]^* dX \quad (13)$$

마찬가지로 식 (10)을 식 (13)에 대입하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$B_{j+1}(X_a) = \frac{\int_0^{X_a} D_x[j]^* dX}{\int_0^{L^*} \exp[-a_{j+1}(X_a) |X - (L^*/2)|^f] dX} \quad (14)$$

식 (7)에 나타낸  $D_x[1]^*$ 의 분포는 실험적 방법으로 구할 수 있으며, 만약 식 (8)의  $a_f(X_a)$ 를 알 수 있다면 식 (12)를 이용하여  $B_2(X_a)$ 를 구할 수 있으므로 최종적으로  $D_x[2]^*$ 의 분포를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 분무중심( $X=0$ )에서  $D_x[2]$ 는  $D_{max}$ 에 비하여 매우 작을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 분무중심에서  $(D_x[2]/D_{max}[2]) \leq 0.05$ 로 가정하여 식 (8)을 이용하여  $a_f(X_a)$ 를 추정하였다.  $j \geq 3$ 의 경우에 있어서도 동일한 방법으로  $a_f(X_a)$ ,  $B_f(X_a)$ 를 구하였다. 이와 같이  $D_x[j \geq 2]^*$ 를 평가함에 있어서 식 (10)과 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 앞서 언급한 바와 같이 주로 2유체 편평 노즐을 이용한 선행 실험결과<sup>(12)</sup>에서 얻은  $a = 0.693$ ,  $f = 1.5$ 의 값을 중심으로 열전달 모델 계산을 수행하였다. Fig. 4에는 주어진

$D_x[1]^*$ 의 분포를 이용하여  $L_{max}^*=4$ 인 경우에 대한  $D_x[2]^*$ ,  $D_x[3]^*$ 의 분포를 계산한 결과를 나타내었다. 또한 Fig. 5에는 무차원 열유속  $q_{ax}[j]^*$ 의 분포를 나타내었으며  $q_{ax}[j]^*$ 는 다음과 같이 정의한다.

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

$$q_{ax}[j]^* = q_{ax}[j] / q_{max} = (1 - C)^{j-1} D_x[j] / D_{max}, j \geq 2 \quad (15)$$

여기서  $q_{max}$ 는 분무중심( $X=0$ )에서 첫 번째 충돌하는 액적의 유량밀도  $D_x[1]$ 에 의한 최대 열유속을 나타낸다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 무차원 거리  $X$ 가 증가함에 따라  $D_x[1]^*$ 는 감소하지만  $D_x[2]^*$ ,  $D_x[3]^*$ 의는 점차 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 5에 나타낸  $q_{ax}[2]^*$ ,  $q_{ax}[3]^*$ 의 경우도 이와 유사한 경향을 보이고 있으나 액적의 충돌횟수가 증가할수록 과냉각도가 감소하여 식 (5)에 나타낸  $(1 - C)^{j-1}$ 에 비례하여 그 값이 작아지는 것을 알 수 있다. 그리고 계산 결과로부터 알 수 있듯이  $q_{ax}[3]^*$ 의 값은  $q_{ax}[1]^*$ 에 비교할 때 매우 작으며 이보다 충돌횟수가 많은  $j \geq 4$ 인 액적에 의한  $q_{ax}[j]^*$ 는 거의 무시할 수 있는 값으로 판단된다. Fig. 6에는  $L_{max}^*$ 를 파라미터로 하여  $q_{ax}[2]^*$ 의 계산결과를 나타내었다.  $L_{max}^*$ 는 액적의 크기, 기류의 속도에 영향을 받는 값으로 판단되며 계산결과로부터 알 수 있듯이  $L_{max}^*$ 가 증가할수록  $q_{ax}[2]^*$ 는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는  $L_{max}^*$ 가 증가할수록 재충돌 구간이 더욱 길어져  $D_x[2]^*$ 가 감소하기 때문으로 생각된다.

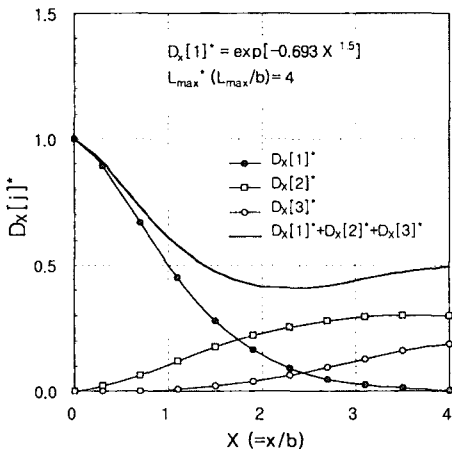


Fig. 4 Calculated results of  $D_x[j]^*$

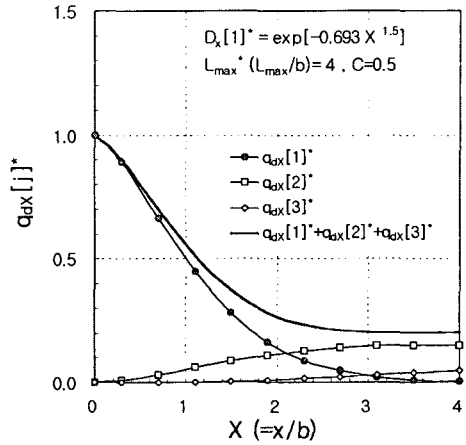


Fig. 5 Calculated results of  $q_{ax}[j]^*$

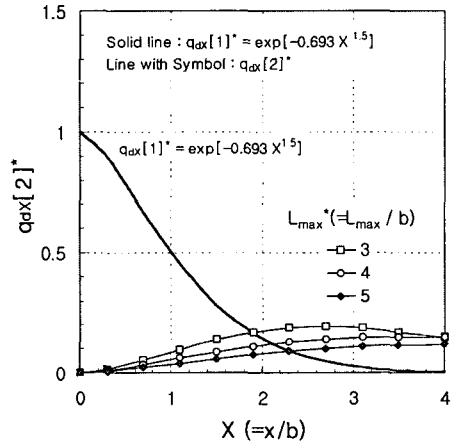


Fig. 6 Calculated results of  $q_{ax}[2]^*$

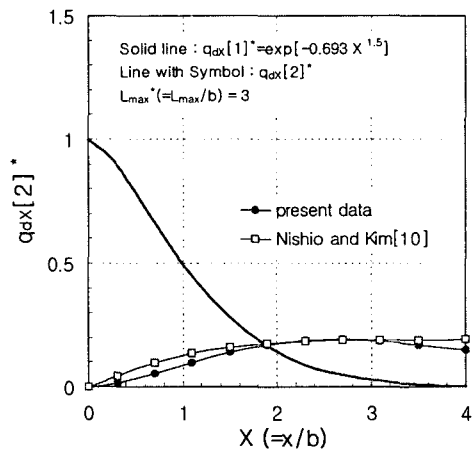


Fig. 7 Comparison of calculated results  $q_{ax}[2]^*$

Fig. 7에는 Nishio et al.<sup>(10)</sup>의 연구에서 제안한 식 (2)를 이용하여  $q_{ax}[2]^*$ 를 계산한 결과를 본 모델에 의한 계산결과와 함께 나타내었다. 단 Nishio et al.의 계산결과는  $X \leq L_{max}^*$ 의 조건에서만 성립된다. 그럼으로부터  $L_{max}^* = 3$ 인 경우 본 연구의 재충돌 모델을 이용하여 계산한  $q_{ax}[2]^*$ 가 약간 작게 나타나고 있으나 그 차이는 그리 크지 않음을 알 수 있다. Nishio et al.의 연구에서는  $D_x[2]$ 의 재충돌 구간을  $0 \sim L_{max}^*$ 로 설정하였지만 본 연구에서는 Fig. 3에서도 나타낸 바와 같이 액적의 초기 충돌위치를 고려한  $0 \sim L^* (=X_a + L_{max}^*)$ 로

가정함으로써 액적의 재충돌 거동을 좀더 실제에 가깝도록 설정하였다. 이러한 차이로부터 동일한  $L_{max}^*$ 에 대해서도  $D_x[2]$ 에 대한 재충돌 구간이 Nishio et al.의 모델보다 다소 길어지게 되는 효과가 발생하며 이 때문에  $q_{ax}[2]^*$ 도 감소하는 것으로 판단된다. Fig. 8에는 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

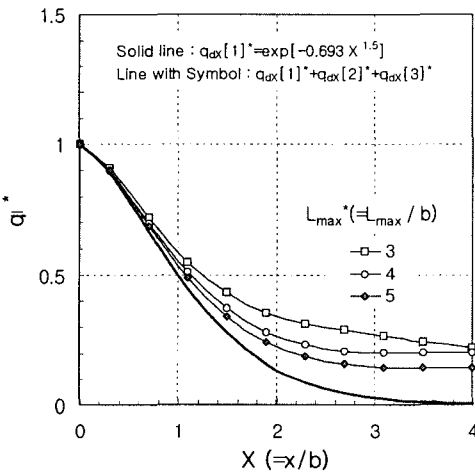


Fig. 8 Calculated results of  $q_i^*$

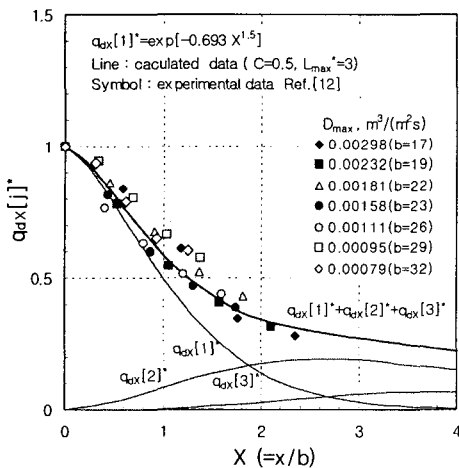


Fig. 9 Comparison between calculated results and experimental data for air-water flat spray

Fig. 9에는 본 열전달 모델을 이용한 계산결과와 기존의 실험결과<sup>(12)</sup>를 비교하였다. 열전달 모델을 이용한 계산에는  $C=0.5$ ,  $L_{max}^*=3$ 의 값을 이용하였으며 실험값에는  $a=0.693$ ,  $f=1.5$ 이며  $D_x=0.0002 \sim 0.003 \text{ m}^2/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $V_a=9 \sim 22 \text{ m/s}$ 의 범위인 비교적 희박 분무영역을 대상으로 한 실험결과를 인용하였다. 위의 실험조건에서  $b=2 \times 10^6 D_{max}^2 - 14107 D_{max} + 39.9$ 의 관계를 얻을 수 있었으며 이 관계식으로부터  $D_{max}$ 가 감소할수록  $b$ 는 점차 증가하는 형태의 분무특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 실험에 사용한 2유체 편평 노즐은 액압을 일정하게 유지한 상태에서 공기의 압력을 증가시키면 분무각이 커져  $b$ 는 증가하고  $D_{max}$ 의 값은 감소하지만 공기압의 증가로 인해 기류의 속도가 급격히 증가하는 분무 특성을 가지고 있다.<sup>(12)</sup> Fig. 9로부터 알 수 있듯이 실험결과는  $L_{max}^*=3$ 인 경우의 계산결과와 비교적 잘 일치하고 있으며,  $L_{max}^*=3$ 으로 거의 일정할 경우  $L_{max}$ 는  $b$ 가 증가할수록 51~96mm의 범위에서 증가하게 된다. 이러한 사실로부터 알 수 있듯이 그림에 나타낸 실험결과와  $D_{max}$ 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 증가하여  $L_{max}$ 가 증가하는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 막 비등 영역에서 액적의 리바운드 모션에 주목한 분무냉각 열전달 모델에 대해 고찰하였다. 특히 본 모델에서는 리바운드에

의한 재충돌 액적의 유량밀도는 재충돌 구간  $0 \sim L^*$ 에서 식 (10)과 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 충돌 거동을 한층 실제상황에 가깝게 표현할 수 있는 것으로 생각된다. 실험결과와의 비교에 있어서도  $C=0.5$ ,  $L_{max}^*=3$ 을 채용한 열전달 모델의 계산결과는 2 유체노즐을 이용한 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 비교결과로부터 2 유체 노즐의 공기압력이 증가할 경우 기류의 속도가 증가해  $L_{max}$ 도 점차 증가하는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) Ohkubo, H. and Nishio, S., 1993, "Study on Mist Cooling for Heat Treatment of Metals," *J. Materials Processing & Manufacturing Science*, Vol. 2, pp. 14~27.
- (2) Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1994, "Spray Cooling with Formation of Liquid Film Flow Distribution of Heat Transfer Coefficient in High Temperature Region," *Trans. of the JSME*, Vol. 60, No. 574, pp. 2158~2164.
- (3) Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1996, "Heat Transfer in High Temperature Region of Spray Cooling Interacting with Liquid Film Flow," *Trans. of the JSME*, Vol. 62, No. 597, pp. 1991~1997.
- (4) Lee, P. J., Jin, S. T. and Lee, S. H., 2004, "A Study on Cooling of Hot Steel Surface by Water-Air Mixed Spray," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 3, pp. 247~255.
- (5) Toda, S., 1972, "A Study of Mist Cooling (1st Report : Investigation of Mist Cooling)," *Heat Transfer Japanese Research*, Vol. 1, pp. 39~52.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Shoji, S., Wakunaga, T. and Kodama, K., 1984, "Heat Transfer Between Hot Surface and Impinging Subcooled Droplet," *Trans. of the JSME*, Vol. 50(B), pp. 716~723.
- (12) 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.