

# 희박 분무영역에서의 분무냉각 막비등 열전달에 관한 연구

김 영 찬<sup>†</sup>

## Study on Film Boiling Heat Transfer of Spray Cooling in Dilute Spray Region

Yeung-Chan Kim

Key Words : Spray cooling (분무냉각), Heat transfer (열전달), Film Boiling (막비등), Heat treatment (열처리), Dilute spray (희박분무), Droplet flow rate (액적유량밀도),

### Abstract

This report presents experimental results on the heat transfer coefficients in the boiling region of spray cooling for actual metallurgical process. In this study, the heat flux distribution of a two dimensional dilute spray impinging on hot plate was experimentally investigated. Based on the experimental results, they classified the heat transfer area into the stagnation region and wall-flow region. In the stagnation region, the local heat transfer coefficient relates mainly to the droplet-flow-rate supplied from spray nozzle directly, so the local heat transfer coefficients is good agreement with the predicted values from correlation for spray cooling proposed by former report. However, the local heat transfer coefficient in wall-flow region is larger than predicted values, and it is found that the rebounding droplets-flow-rate must be accurately evaluated to predict the local heat transfer coefficient in this region.

### 기호설명

$D_x$	: x 축 방향의 액적유량밀도 [ $m^3/(m^2s)$ ]
$D_{max}$	: 분무중심에서의 액적유량밀도 [ $m^3/(m^2s)$ ]
$h$	: 열전달계수 [ $W/m^2\text{ }^\circ C$ ], $q_w / \Delta T_{sat}$
$k$	: 열전도계수 [ $W/m\text{ }^\circ C$ ]
$q_w$	: 열유속 [ $W/m^2$ ]
$Q_d$	: 전체 유량 [ $l/min$ ]
$T_a$	: 주위 공기온도 [ $^\circ C$ ]
$T_w$	: 냉각면의 표면온도 [ $^\circ C$ ]
$x$	: 분무중심에서의 거리 [ $mm$ ]
$\Delta T_{sat}$	: 전열면의 과열온도, $T_w - T_{sat}$

### 1. 서론

금속재료의 가공·열처리(Thermo Mechanical Control Process)에서는 강재의 성질을 제어하기 위해 가속 냉각을 소정의 온도에서 정지할 필요가 있으나 이때에 냉각영역(cooling zone)의 출구에 있어서 강재의 온도가 불균일하게 되는 냉각 불안정 현상이 큰 문제점으로 지적되고 있다. 특히 이러한 냉각 불안정 현상은 주로 강재 표면에 공급되는 분무액적유량의 불균일, 강재 표면에서의 액막 형성 등으로 인한 표면 열전달률의 불균일에 기인한다고 할 수 있으며, 그 결과 생산된 강재는 내부성질의 불균일, 잔류응력의 발생 등으로 인해 품질이 크게 저하되는 경향을 보이고 있다. 이러한 강재의 가공·열처리과정에서 발생하는 문제점들을 해결하고자 분무냉각에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다<sup>(1-5)</sup>.

<sup>†</sup> 안동대학교 기계공학부

E-mail : yeung@andong.ac.kr

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

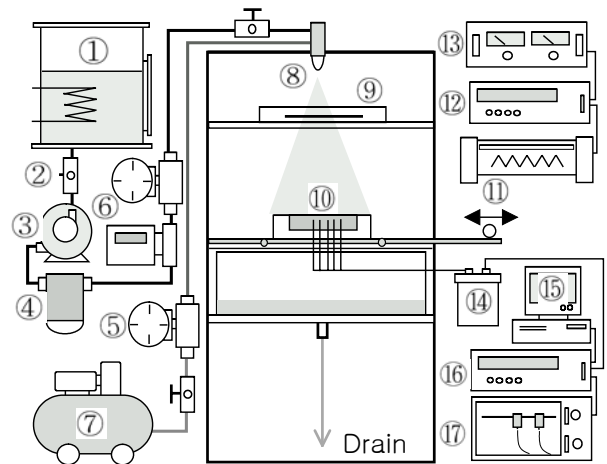
특히 과거 연구에서는 분무냉각 열전달에 있어서 강제 표면에 형성되는 액막 유동의 영향을 규명하기 위해 액적유량밀도가  $0.002 \sim 0.02 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 범위이고 냉각면의 두께가 20 mm 정도의 비교적 두꺼운 스테인레스 강을 대상으로 분무냉각 막비등 열전달실험<sup>(1)</sup>과 액막류에 대한 막비등 열전달실험<sup>(2)</sup>, 그리고 분무액적과 액막유동이 상호 간섭하는 경우의 분무냉각 열전달실험<sup>(3)</sup>을 수행하여 이에 대한 기초적 정보를 제공하였다. 또한 이러한 실험결과에 기초하여 분무액적의 재충돌 (impact-rebound motion)과 현열이동(sensible heat transfer)에 주목한 분무냉각 막비등 열전달 모델을 수립하였다<sup>(4)</sup>. 이러한 일련의 연구에도 불구하고 분무냉각 열전달은 그 메커니즘이 매우 복잡하여 그 실체가 명확히 밝혀지지 않고 있는 상황이며, 또한 좁은 범위의 액적유량밀도를 대상으로 실험한 연구결과를 실제 산업현장에 적용하기 위해서는 보다 넓은 범위의 액적유량밀도를 대상으로 실험하여 과거 연구결과와의 신뢰성을 확인하여야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

본 연구는 분무냉각 열전달에 관한 후속 연구로서 2 유체 편평 분무노즐 (twin fluid flat spray nozzle)을 사용하여 액적유량밀도가  $0.003 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 보다 적고 액적의 크기가  $100 \mu\text{m}$  이하인 비교적 희박한 분무영역에서 분무냉각 열전달 실험을 수행하여 지난 연구에서 제안한 열전달 관계식의 신뢰성을 확인하고자 한다. 분무유량과 액적의 크기가 작은 희박 분무영역에서는 액막(liquid film)이 형성되기 어려우며 충돌 액적에 의한 열전달 비율은 점차 줄어들고 복사 및 기류에 의한 열전달 비율이 증가하게 되어 이 영역에서는 기류와 복사 열전달의 정확한 평가가 매우 중요할 것으로 생각된다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험장치는 크게 나누어 ① 냉각속도의 측정이 가능한 냉각면 (heat transfer plate)과 열전대, ② 2 유체 분무노즐 및 부대장치, ③ 적외선 가열장치, ④ 데이터 기록 및 처리장치 등으로 구성되어 있다. 본 실험장치의 기본적인 구성은 기존의 연구와 거의 유사하지만 분무노즐, 냉각면을 포함한 모든 부분을 완전히 새롭게 제작하였다. 특히 앞

서 설명한 바와 같이 지난 연구에서 가압식 분무노즐을 사용한 것과는 다르게 본 연구에서는 2 유체 편평 분무노즐 (Ikeuchi社, BMV)을 사용하였으며 2 유체 노즐을 사용함으로써 공기압과 액압을 적절히 조절하여 비교적 넓은 범위의 액적유량밀도 분포를 표현할 수 있도록 하였다. 또한 기류(air flow)의 속도 및 액적의 크기 등의 영향에 대한 연구가 가능할 것으로 판단된다.



① Water tank ② Valve ③ Pump ④ Filter ⑤ Pressure Regulator ⑥ Digital Flow Meter ⑦ Air Compressor ⑧ Twin Fluid Flat Spray Nozzle ⑨ Spray Shutter ⑩ Heat Transfer Plate ⑪ Infrared Heater ⑫ Controller ⑬ Power Supply ⑭ Cold Junction ⑮ Computer ⑯ Data Logger ⑰ Pen Recorder

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

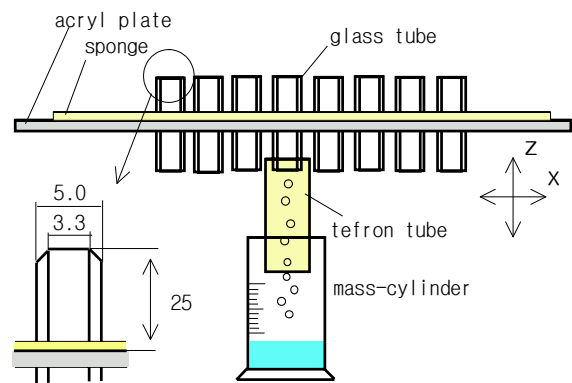


Fig. 2 Measurement of droplet flow rate

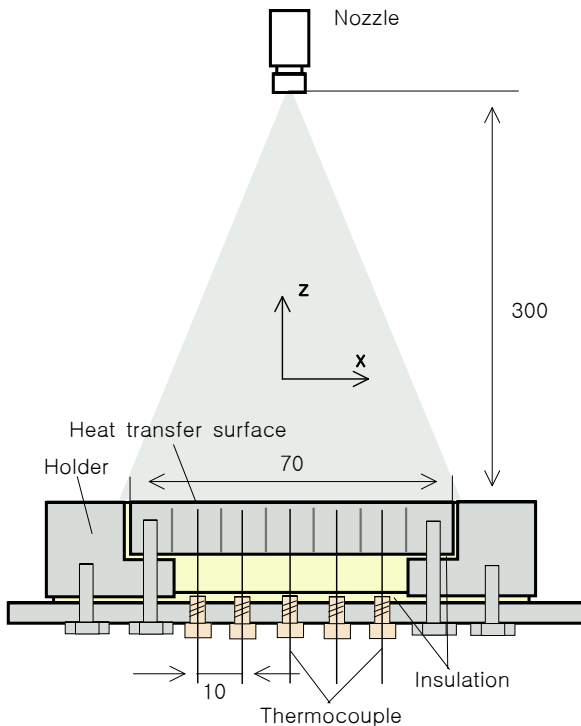


Fig. 3 Schematic of heat transfer plate

### 2-1 액적유량밀도의 측정

본 연구에서는 액적유량밀도  $D_x$ ,  $D_y$  ( $D_x$ ,  $D_y$ :  $x$ ,  $y$ 방향으로의 액적유량밀도) 및 액적의 온도를 측정하였다. 본 연구에서는 2 유체 편평 분무노즐을 사용하였으며 편평 노즐 (flat spray nozzle)은 일반적으로  $x$  방향으로는 현저한 유량밀도 분포를 가지고 있으나  $y$  방향으로는 거의 분포가 존재하지 않고 액적유량밀도가 일정하게 나타나는 2 차원적인 특징을 가지고 있다. 냉각면에 공급되는 액적의 유량분포는 내경 3.3 mm의 유리관을 이용하여 포집하였다. 또한 Fig. 2에 나타난 바와 같이 액적포집용 유리관을 아크릴판의 평면 위치보다 25 mm 높게 설정함과 동시에 스펀지를 설치하여 액적이 아크릴판에 일차 충돌한 후 튀어 올라 유리관에 포집되는 현상으로 인해 발생할 수 있는 측정오차를 최소화하였다. 노즐을 통과하는 전체유량  $Q_d$ 는 액체를 펌프를 이용하여 가압함과 동시에 공기압을 변화시킴으로써 조절할 수 있도록 하였다. 본 연구가 대상으로 한 유량  $Q_d$ 의 범위는 0.13 ~ 2.17 l/min이며, 분무중심에서의  $D_{max}$  값은 0.0005 ~ 0.003 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>s)의 비교적 희박한 유량밀도 범위에서 실험을 수행하였다. 이러한 조건에 해당되는 공기압의 범위는 100 ~ 400 kPa이며,

액압의 범위는 50 ~ 200 kPa이다. 액적 온도는 약 25°C로 균일하게 설정하여 실험을 행하였다.

### 2-2 냉각면의 구조

본 실험에서는 초기온도 800°C 정도의 수평 냉각면에 분무액적을 공급함으로써 냉각면을 실온까지 냉각시키는 비정상 실험을 수행하였다. 냉각면은 가로×세로×두께( $x$ ,  $y$ ,  $z$ )가 70×70×10 mm의 스테인레스강(SUS304)으로 제작하였으며 적외선 가열장치를 이용하여 일정 온도까지 가열된다. 냉각면은 Fig. 3에 나타난 동일한 재질로 제작된 고정틀에 볼트로 고정되어 있으며 냉각면과 고정틀 사이, 냉각면의 후면 등에는 단열성이 우수한 세라믹계 재료를 이용하여 단열 처리하였다. 그림에서도 알 수 있듯이 냉각면의 후면에는 폭 0.5 mm, 깊이 9 mm의 홈(slit)을 가공하여 전열면 내부에서 수평방향( $x$ ,  $y$  방향)으로의 열전도를 차단하여 수직방향( $z$  방향)의 일차원적인 열전도가 발생할 수 있도록 배려했다. 홈은 와이어(wire) 방전가공을 이용하여 제작하였으며 홈 내부에는 세라믹계 단열재를 삽입하였다. 또한 냉각면에는  $x$  방향으로 5 개의 열전대를 냉각면 표면에서부터 약 2 mm의 위치에 설치하여 냉각면의 온도이력을 측정하였다. 열전대는 상술한 홈들로 둘러싸인 영역의 중심부(각 블록의 중심부)에 설치하였으며 측정된 각 위치의 온도이력을 일차원 열전도 역산법(inverse method)에 적용하여 냉각면 표면에서의 온도, 열유속, 열전달률을 계산하였다. 본 연구에서는 이와 같이 계산된 열전달률이 영역에서의 국소 열전달률  $h_x$ 로 나타내었다. 사용한 열전대는 K type이며 고온에도 견딜 수 있는 외경 0.9 mm의 sheath형 열전대를 주문 제작하여 사용하였다. 또한 Fig. 5에 나타난 바와 같이 지정된 위치에 밀착되어 온도를 측정할 수 있도록 스프링을 장착하였으며 sheath부의 산화방지 및 열전대 측온부와 냉각면 사이의 열적 접촉을 보존하기 위해 각각의 열전대 삽입용 구멍에는 고온용 윤활유를 충전하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1 액적유량밀도의 측정결과

Fig. 4에 본 연구에서 사용된 분무노즐에 대한  $x$  방향의 액적유량밀도(droplet flow rate) 분포를

나타내었다. 그림에는 분무중심에서의 액적유량 밀도  $D_{max}$  를 이용하여 무차원한 ( $D_x/D_{max}$ )의 값을 무차원 좌표계 ( $x/b$ )에 대하여 나타내었다.  $b$ 는  $D_{max}$  의 50% 값을 나타내는  $x$  값이며  $D_{max}$  의 함수로 나타낼 수 있다.  $y$  방향으로의 액적유량 밀도 분포는 그림에는 나타내지는 않았으나 본 실험 범위에서는  $y$ 값에 상관없이 일정하게 나타났으며 그 값은 분무중심( $x=0$ )에서의  $D_{max}$  와 거의 동일함을 알 수 있었다. 즉 본 연구에서는 한쪽 방향으로만 액적유량 밀도의 분포가 존재하는 이차원적인 노즐을 이용하여 액적유량 밀도 분포가 현저히 존재하는  $x$  방향을 중심으로 열전달 분포의 측정 및 검토를 수행하였다.

3-2 측정값의 오차추정

본 연구에서는 Fig. 5에 나타낸 것과 같은 냉각면 내부의 온도 측정값에 기초하여 Beck<sup>(6)</sup>이 제안한 열전도 역산법과 동일한 방법을 이용하여 냉각면의 표면온도 및 열유속을 계산하였다. 즉 Fig. 6에는  $D_{max} = 0.00298 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$  일 경우에 있어서 표면으로부터 2mm 지점에 위치한 열전대를 이용하여 냉각과정중의 온도이력을 측정하여 대표적인 실험결과를 나타내었으며 이러한 온도 측정값을 1차원 열전도 역산법에 적용하여 냉각면의 표면온도 및 열유속을 계산하였다. 이러한 방법을 이용하여 표면온도 및 열유속을 계산할 때 열전대의 삽입위치와 온도측정의 시간간격은 실험오차에 큰 영향을 미칠 수 있으며 본 연구에서는 실험에 앞서 이러한 실험오차에 대해 검토하였다. 실험오차의 추정방법은 우선 실험에 이용한 냉각면과 동일한 두께, 재질의 냉각면의 초기 온도를 약 800℃로 설정하여 이 냉각면 표면에 Fig. 6에 실선으로 나타낸 임의의 열유속  $q_w$ 를 인가하여 냉각면 내부의 온도 변화를 계산한다. 그 다음에 계산된 냉각면 내부의 온도이력을 열전도 역산법에 적용하여 열유속을 역으로 계산하여 처음 가정한 임의의 열유속  $q_w$ 와 비교하여 실험오차를 추정하였다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 냉각속도가 비교적 느린 막비등 영역에서는 온도측정의 시간간격이 2초 이하에서 처음 가정한 열유속  $q_w$ 와 역산법을 이용하여 재계산한 열유속(기호로 표시)은 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

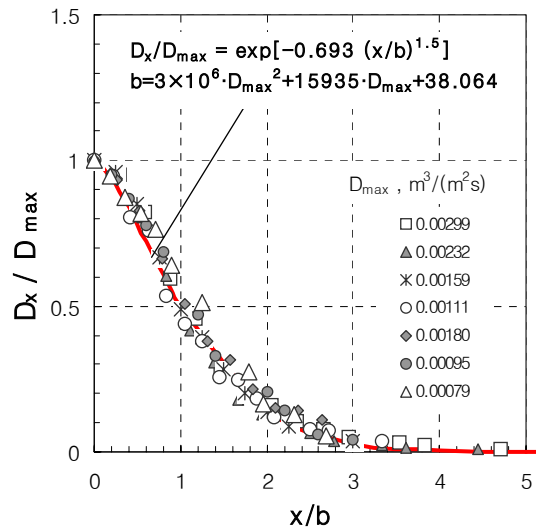


Fig. 4 Distributions of droplet flow rate

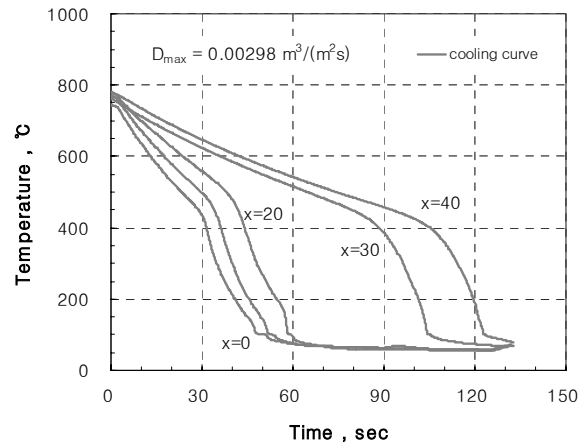


Fig. 5 Cooling curve

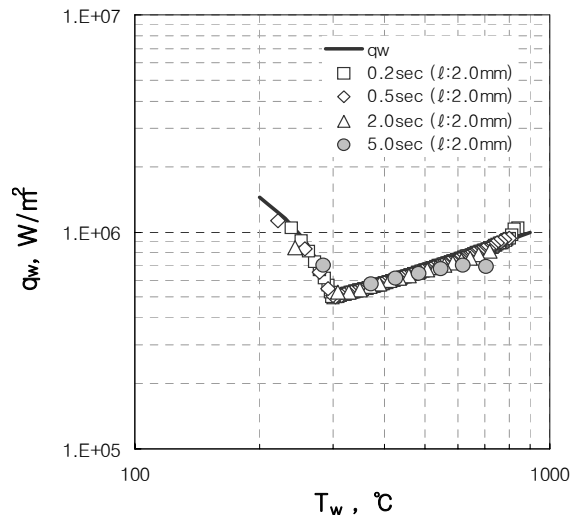


Fig. 6 Error estimation

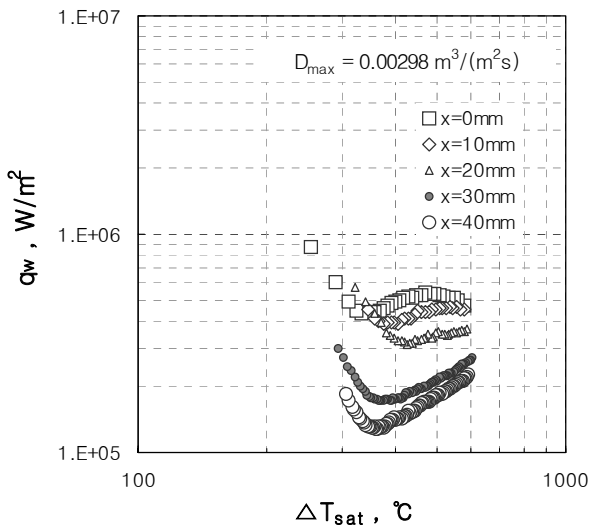


Fig. 7 Local heat flux of spray cooling

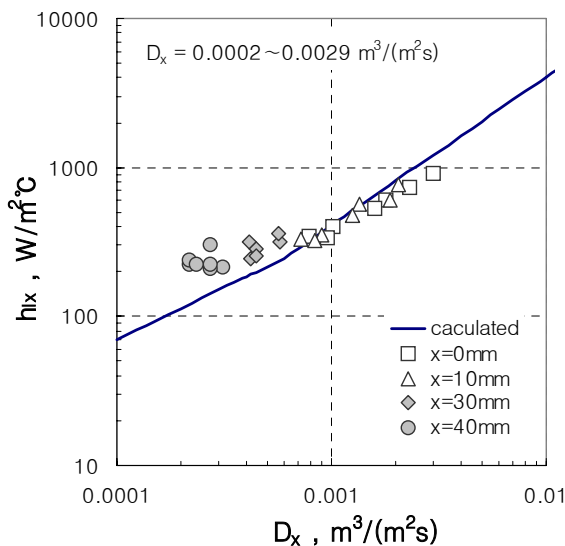


Fig. 8 Correlation between local heat transfer coefficient and droplet-flow-rate in spray cooling

또한 냉각면은  $x$ ,  $y$  방향의 열전달을 방지하기 위해 폭 0.5 mm의 홈을 가공하였으나 Fig. 3에 나타난 바와 같이 두께 1 mm의 스테인레스강에 의해 연결되어 있는 상태이다. 이 영역에 있어서는 각 블록 상호간  $x$ ,  $y$  방향으로 열전달이 가능하며 이로 인해 측정오차가 발생할 수도 있다. 본 연구에서는 이러한 영향을 검토하였으며 그 결과 모든 오차범위는  $\pm 3\%$  이내였음을 확인하였다.

3-4 기류(Air flow) 및 복사(輻射)에 의한 열전달 평가  
분무유량이 비교적 적은 영역에서는 충돌액적

에 의한 열전달은 점차 줄어들며 복사 및 기류에 의한 열전달이 증가하게 되어 이 영역에서는 기류와 복사열전달의 정확한 평가가 매우 중요할 것으로 생각된다. 임의의 위치  $x$  지점에 있어서 희박 분무류에 의한 전체 열전달  $q_w$ 는  $q_l + q_a + q_r$ 의 합으로 나타낼 수 있다. 여기서  $q_l$ 은 분무액적에 의한 열전달,  $q_a$ 는 기류에 의한 열전달,  $q_r$ 은 복사에 의한 열전달을 각각 나타낸다. 기류에 의한 열전달  $q_a$ 는 각각 다음의 식<sup>(5)</sup>을 참고하였다.

$$q_a = 5.4 \text{ Pr}^{0.4} k_a (V/v_a)^{0.5} (T_w - T_a) \quad (1)$$

여기서  $T_w$  및  $T_a$ 는 냉각면 표면 및 공기의 온도이며  $\text{Pr}$ ,  $k_a$ ,  $v_a$ 는 공기의 Prantl 수, 열전도계수 및 동점성계수,  $V$ 는 기류 속도를 각각 나타낸다. 이와는 별도로 본 연구에서는 공기만을 일정압력으로 가압하여 기류 및 복사에 의한 냉각실험을 수행하였으며 또한 냉각면의 측면과 후면으로부터의 열손실을 측정하기 위해 두께 40 mm 정도의 세라믹계 단열재를 이용하여 냉각면 표면을 완전히 단열한 후 자연 냉각시켜 순실 열유속을 구하였다. 이러한 과정들로부터 기류 또는 순수 분무액적에 의한 열유속을 산출할 수 있었다.

### 3-5 분무냉각 막비등 열전달 실험결과

Fig. 7에는 전체 열유속  $q_w$ 와 표면온도  $\Delta T_{\text{sat}}$ 와의 관계를 분무중심으로부터의 거리  $x$ 를 파라미터로 한 대표적인 실험결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 액적유량이 큰 분무중심에서 가장 열유속이 높게 나타나고 있으며  $x$ 가 증가할수록 액적유량이 감소하기 때문에 열유속도 이와 함께 점차 감소하고 있다. 또한 그림에는 나타내지 않았지만  $D_{\text{max}}$ 가 감소할수록 분무중심과 주변영역의 액적유량밀도의 차이가 점차 작아지고 또한 기류에 의한 열전달의 비율이 증가하기 때문에  $x$ 의존성은 점차 약해지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8에는 국소 열전달률(local heat transfer coefficient)  $h_{ix}$ 와 액적유량밀도  $D_x$ 와의 관계를 나타내었다. 여기서  $h_{ix}$ 는 분무중심으로부터의 거리  $x$  위치에서 순수 액적에 의한 열전달률을 나타낸다. 또한 그림에는 액적유량밀도  $D_x = 0.002 \sim 0.03 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 범위를 대상으로 실험한 기존의 연구 결과<sup>(1)</sup>에서 얻어진 아래의 식을 이용하여 계산한

결과를 실선으로 나타내었다.

$$h_1 = 9.07 \times 10^6 D \Delta T_{\text{sat}}^{-0.5} \quad \text{for } D \leq 0.0006 \quad (2)$$

$$h_1 = 9.82 \times 10^5 D^{0.7} \Delta T_{\text{sat}}^{-0.5} \quad \text{for } D > 0.0006 \quad (3)$$

그림에서 알 수 있듯이  $x \leq 10$  mm 인 분무중심 영역에서는 기존의 연구결과에서 얻어진 식을 이용한 계산결과와 잘 일치하고 있으나  $x \geq 30$  mm 의 영역에서는 계산결과보다 비교적 높은 값을 나타내고 있다. 이는  $x$ 가 증가할수록 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 재충돌(impact-rebound motion)에 의한 액적유량이 증가하여 이로 인해 열전달률이 다소 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그림에서  $D_x[1]$ 은 분무노즐에서 직접 냉각면 표면에 충돌하는 액적을 의미하며  $D_x[2]$ 는 재충돌에 의한 액적을 나타낸다. 그러나 Fig. 8의 가로축에 나타낸  $D_x$ 에는 이러한 재충돌에 의한 액적유량이 포함되지 않도록 측정장치를 구성하였기 때문에  $x \geq 30$  mm의 영역에서 열전달률을 정확히 예측하기 위해서는 재충돌 액적에 대한 평가가 필요할 것으로 판단된다. 과거 이러한 재충돌 액적의 거동을 고려한 분무냉각 비등 열전달에 대한 연구<sup>(4)</sup>가 있었으나 이 연구에서는 액적의 재충돌 거동을 가정함에 있어서 액적의 충돌속도, 크기 등을 고려하지 않은 단순한 액적의 충돌모델을 대상으로 수행하였으며 실제의 액적의 재충돌 거동은 이 보다 훨씬 복잡할 것으로 판단된다. 향후 액적유량과 크기가 비교적 작은 희박 분무영역에서의 분무냉각 막비등 열전달모델의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

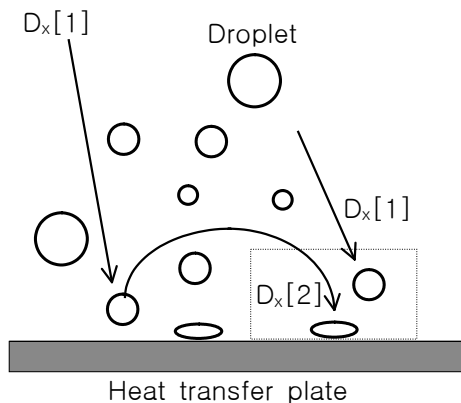


Fig. 9 Droplet behavior on hot plate

## 4. 결 론

본 연구에서는 금속 재료의 고정밀 냉각제어를 실현하고자 비교적 희박분무영역을 대상으로 분무냉각 열전달 실험을 수행하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 본 실험범위에서  $x \leq 10$  mm 인 분무중심영역에서는 기존의 연구결과에서 얻어진 분무냉각 열전달 관계식을 이용한 계산결과와 잘 일치하고 있으나  $x \geq 30$  mm의 영역에서는 관계식을 이용한 계산결과보다 다소 높은 값을 나타내고 있었다.

(2) 주변영역에서는 재충돌에 의한 액적유량이 증가하여 이로 인해 열전달률이 다소 증가하는 것으로 판단되며 이 영역에서 분무냉각 열전달률을 정확히 예측하기 위해서는 액적의 크기, 충돌속도 등을 고려한 액적의 재충돌 거동에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1994, "Spray Cooling with Formation of Liquid Film Flow", Transactions of JSME, Vol. 60-574, pp. 2158-2164
- (2) Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1995, "Spray Cooling with Formation of Liquid Film", Transactions of JSME, Vol.62-594, pp. 734-739
- (3) Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1996, "Heat Transfer in High Temperature Region of Spray Cooling Interacting with Liquid Film Flow", Transactions of JSME, Vol.62-597, pp. 1991-1997.
- (4) 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.
- (5) Ito, T., Takata, T., Liu, Z. H., 1989, "On the Water Cooling on Hot Surface", Transactions of JSME, Vol.55-511, p. 805-813.
- (6) Beck, J. V., 1970, "Nonlinear Estimation Applied to the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 13, pp. 703-716.