

< 기술논문 >

## 물-공기 원추형 분무시스템에 있어서 분무냉각 막비등 열전달에 관한 연구

김 영 찬<sup>†</sup> · 윤 승 민<sup>\*</sup>

(2006년 5월 15일 접수, 2006년 10월 2일 심사완료)

### Study on Film Boiling Heat Transfer of Spray Cooling in Air-Water Full Cone Spray System

Yeung-Chan Kim and Seung-Min Yun

**Key Words :** Spray Cooling(분무냉각), Heat Transfer(열전달), Film Boiling(막비등), Heat Treatment(열처리), Full Cone Spray(원추형 분무)

#### Abstract

The local heat flux of spray cooling in the film boiling region were experimentally investigated for the spray region of  $D_{max} = 0.005 \sim 0.03 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ . A twin-fluid full cone spray nozzle was employed for the experiment and the distributions of droplet flow rates were obtained for air-water full cone sprays. A stainless steel block was cooled down from initial temperature of about  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  by full cone spray. In the region near the stagnation point, it was found that the experimental data are in good agreement with the results predicted from the correlations between the local heat transfer and the local droplet flow rate proposed in the previous report. However, it was found that the experimental data of  $D_r > 0.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$  are a little smaller than the results predicted from the correlations.

#### 기호설명

- $D_r$  :  $r$  방향의 액적유량밀도 [ $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ ]
- $D_{max}$  : 분무중심에서의 액적유량밀도 [ $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ ]
- $h$  : 열전달계수 [ $\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ ]
- $k_a$  : 공기의 열전도계수 [ $\text{W}/\text{m }^\circ\text{C}$ ]
- $P_r$  : 공기의 Prantl 수
- $q_w$  : 표면 열유속 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $T_a$  : 주위 공기온도 [ $^\circ\text{C}$ ]
- $T_w$  : 냉각면의 표면온도 [ $^\circ\text{C}$ ]
- $r$  : 분무중심에서의 거리 [mm]

- $\Delta T_{sat}$  : 전열면의 과열온도,  $T_w - T_{sat}$
- $V_a$  : 기류속도 [m/s]
- $v_a$  : 공기의 동점성계수 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

#### 1. 서론

냉각성능이 우수하고 냉각속도의 제어가 가능한 분무냉각기술은 금속재료의 가공·열처리, 경수로의 냉각장치, 식품의 동결장치 등에 활발히 이용되고 있으며 향후 고밀도 전자부품의 냉각, 고성능 소형 열교환기에의 활용을 목표로 많은 연구가 진행되고 있다.

Toda<sup>(1,2)</sup>는 액적의 충돌거동에 기초하여 저온영역과 고온영역에 있어서 각각의 분무냉각 열전달 모델을 제안하였으며, 이후 Bolle and Moureau,<sup>(3)</sup>

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학부  
E-mail : yeung@andong.ac.kr  
TEL : (054)820-6013 FAX : (054)820-5092

\* 안동대학교 대학원 기계공학부

Ito et al.,<sup>(4)</sup> Ohkubo and Nishio,<sup>(5)</sup> Bernadin and Mudawar<sup>(6)</sup> 등 많은 연구자들이 분무냉각 열전달에 대한 실험 및 해석적 연구를 수행하여 분무냉각 열전달에 영향을 미치는 요소들을 파악하고 또한 분무냉각 열전달을 예측하기 위한 경험식들을 제안하였다.

Kim et al.<sup>(7-14)</sup>은 현재까지 주로 금속재료의 가공·열처리과정에서 발생하는 냉각불안정 현상을 규명하고 대책을 마련하고자 일련의 연구를 수행하였다. Kim et al.<sup>(7)</sup>의 연구에서는 분무중심에서 액적의 유량밀도가 0.002~0.008 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>s)의 분무영역을 대상으로 막비등 열전달 실험을 수행하여 액적유량밀도와 분무냉각 열전달에 대한 열전달 상관식을 제안하였다. 이후 분무중심에서 액적유량밀도가 0.0007~0.003 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>s)의 범위이고 액적의 크기가 100 μm 이하인 비교적 희박한 분무영역에서 열전달 실험을 수행하여, 최초 제안한 열전달 상관식이 비교적 희박한 분무영역에서도 열전달률의 예측을 위해 활용될 수 있음을 입증하였다.<sup>(8)</sup> 또한 분무류를 이용한 냉각과정에 있어서 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 냉각면 표면에 형성되는 액막의 영향을 규명하기 위한 실험적 연구<sup>(9,10)</sup>를 수행하였으며, 냉각불안정 현상에 큰 영향을 미치는 MHF (minimum heat flux) 점<sup>(11,12)</sup>에 대한 기초정보를 제공하였다. 그리고 이러한 일련의 실험결과에 기초하여 액적의 리바운드모션 (rebound motion)과 현열이동(sensible heat transfer)에 주목한 막비등 영역에서의 분무냉각 열전달 모델을 수립하였다.<sup>(13,14)</sup>

본 연구에서는 분무중심에서의 액적의 유량밀도가 0.005~0.03 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>s)의 범위인 비교적 농후한 분무영역에서 열전달 실험을 수행하여 선행 연구에서 제안한 열전달 상관식의 신뢰성을 확인하고자 한다. 특히 본 연구에서는 선행 연구<sup>(7,8)</sup>에서 주로 2차원 편평노즐(flat nozzle)을 사용한 것과는 다르게 원추형(full cone) 분무노즐을 사용하여 분무냉각 열전달특성을 파악하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치의 구성과 실험방법은 Kim et al.<sup>(7,8)</sup>의 연구와 거의 유사하므로 여기서는 간략히 설명하기로 한다. 다만, 선행 연구에서 편평 노즐을 사용한 것과는 다르게 본 실험에서는 원추형 노즐

(Ikeuchi BIMV)을 사용하여 분무노즐의 특성이 분무냉각 열전달에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 실험에는 물-공기 2 유체 분무노즐을 사용하였으며, 공기압과 액압을 적절히 조절하여 다양한 형태의 액적유량밀도 분포를 나타낼 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 초기온도 800℃ 정도의 수평 냉각면에 분무액적을 공급함으로써 냉각면을 실온까지 냉각시키는 비정상 실험을 수행하였다. 냉각면은 가로×세로×두께가 70×70×10 mm의 스테인레스강(SUS304)으로 제작하였으며, 적외선 가열장치를 이용하여 가열된다.

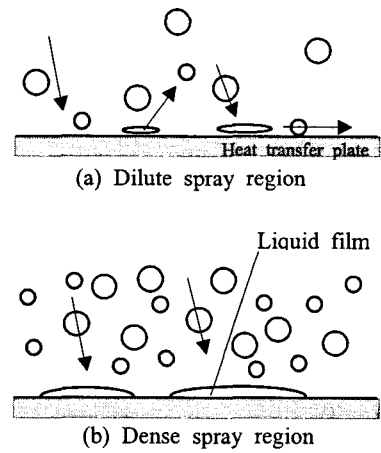


Fig. 1 Liquid film formation in spray cooling

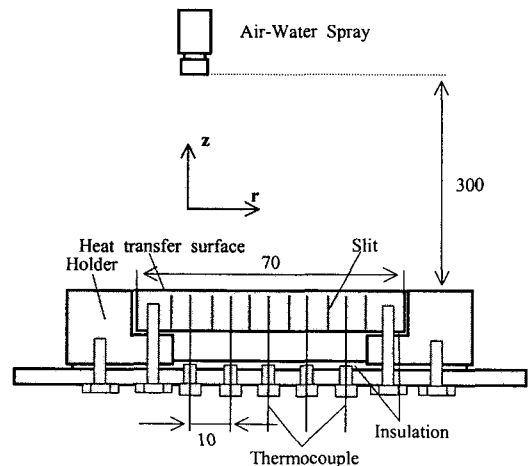


Fig. 2 Schematic of heat transfer plate

냉각면은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 동일한 재질로 제작된 고정틀에 볼트로 고정되어 있으며, 냉각면과 고정틀 사이, 냉각면의 후면 등에는 단열성이 우수한 세라믹 재료를 이용하여 단열 처리하였다. Fig. 2에서도 알 수 있듯이 냉각면의 후면에는 폭 0.5 mm, 깊이 9 mm의 홈(slit)을 가공하여 전열면 내부에서 r 방향으로의 열전도를 차단하여 수직방향(z 방향)의 일차원적인 열전도가 발생할 수 있도록 배려하였다. 냉각면에는 r 방향으로 5 개의 K type 열전대(직경 0.9 mm)를 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 표면의 온도, 국소 열유속, 국소 열전달계수를 계산하였다. 또한 본 연구에서는 액적유량밀도( $D_r$ ) 및 액적의 온도를 측정하였으며 냉각액체는 물을 사용하였다. 냉각면에 공급되는 액적의 유량분포는 내경 3.3 mm의 유리관을 이용하여 측정하였으며, 이 유리관은 r 방향으로 여러 개를 아크릴판에 부착하여 한 번에 다수의 측정치를 얻을 수 있도록 제작하였다. 노즐을 통과하는 전체유량은 액체를 펌프를 이용하여 가압함과 동시에 공기압을 변화시킴으로써 조절할 수 있도록 하였으며, 분무중심에서의  $D_{max}$  값은 0.005~0.03  $m^3/(m^2s)$ 의 비교적 높은 유량밀도 범위에서 실험을 수행하였다. 이러한 조건에 해당하는 공기압의 범위는 100~300 kPa이며, 액압의 범위는 100~200 kPa이다. 액적의 온도는 약 25°C로 설정하여 실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

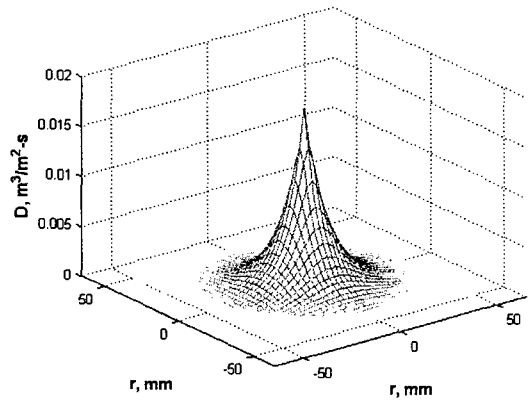
#### 3.1 액적유량밀도의 측정결과

Fig. 3(a)에는  $D_{max}=0.0107 m^3/(m^2s)$ 의 경우에 대하여 r 방향의 유차원 액적유량밀도 분포를 나타내었으며, Fig. 3 (b)에는 무차원 액적유량밀도 ( $=D_r/D_{max}$ )를 무차원 r 방향거리( $=r/b$ )에 대하여 나타내었다. b는 상수이며 액적유량밀도의 측정오차는 ±5% 이내로 추정된다. Fig. 3 (b)에 나타난 바와 같이 본 실험에서 사용한 2 유체 원추형 노즐에 대한 r 방향의 액적유량밀도 분포는 다음의 식으로 나타낼 수 있었다.

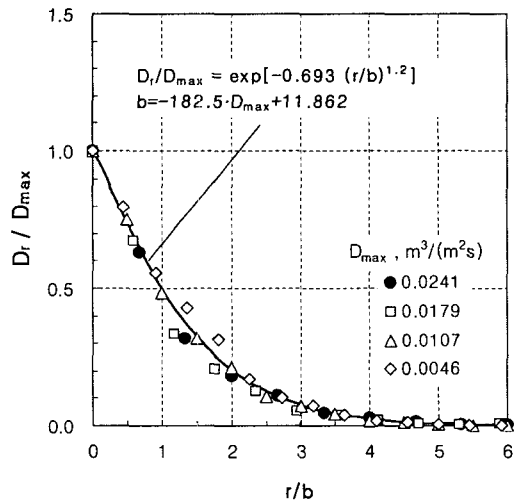
$$D_r / D_{max} = \exp [-0.693 (r/b)^{1.2}] \tag{1}$$

$$b = -182 \cdot D_{max} + 11.862 \tag{2}$$

본 실험에서 사용한 2 유체 분무노즐의 경우 액압을 일정하게 유지한 상태에서 공기의 압력을 증가시키면 식 (2)에서 상수 b가 증가하여 분무각은 증가하지만  $D_{max}$ 는 점차 감소하는 형태의 분무특성을 가지고 있다. 즉  $D_{max}$ 가 감소할수록 분무중심과 주변영역의 액적유량밀도의 차이는 점차 작아져 r 방향의 유량밀도 분포가 점차 편평해지는 것을 알 수 있었다.



(a)  $D_{max}=0.0107 m^3/(m^2s)$



(b)  $D_{max}=0.0046\sim0.0241 m^3/(m^2s)$

Fig. 3 Distributions of droplet flow rate

3.2 분무냉각 막비등 열전달

Fig. 4에는 냉각면 표면으로부터 2 mm의 위치에서 설치된 열전대를 이용하여 냉각면 내부의 온도를 측정된 대표적인 결과를 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 액적유량이 가장 큰 분무중심에서 냉각속도가 가장 빠르며 주변영역으로 갈수록 냉각속도가 점차 느려지고 있다. 본 연구에서는 Fig. 4에 나타낸 것과 같은 냉각면 내부의 온도 측정값에 기초하여 Beck<sup>(15)</sup>이 제안한 열전도 역산법(inverse method)과 동일한 방법을 이용하여 냉각면의 표면온도 및 열유속을 계산하였다. 본 연구에서는 냉각면의 초기온도를 약 800°C로 설정하여 이 냉각면 표면에 임의의 열유속을 인가하여 냉각면 내부의 온도 변화를 계산한 다음에 계산된 냉각면 내부의 온도이력을 열전도 역산법에 적용하여 열유속을 역으로 계산하여 처음 가정한 임의의 열유속과 비교하여 온도측정에 대한 실험 오차를 추정하였으며, 그 결과 실험오차는 ±3% 이내였음을 확인하였다.<sup>(7,8)</sup>

Fig. 5에는  $q_w$ 와  $\Delta T_{sat}$ 와의 관계를 분무중심에서의 거리  $r$ 을 파라미터로 나타내었다. Fig. 5에 나타낸 실험결과는 냉각과정에 있어서 0.2초 간격으로 냉각면 내부의 온도를 측정된 후 이 값을 열전도 역산법 적용하여 표면온도 및 열유속을 계산하였으며, Fig. 5에는 1.0초 간격으로 계산결과를 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 액적유량이 큰 분무중심에서 열유속이 가장 크며  $r$ 이 증가할수록 액적유량이 감소하기 때문에 열유속도 이와 함께 점차 감소하고 있다. 또한 Fig. 5에 나타낸 두 그림의 비교에서 알 수 있듯이 열유속

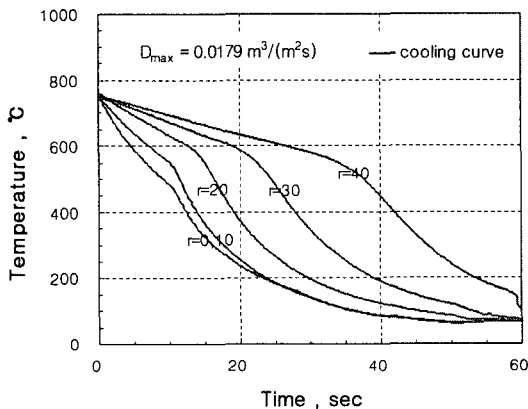
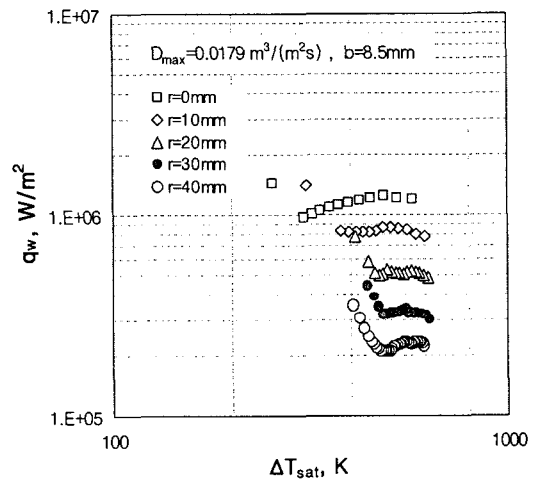
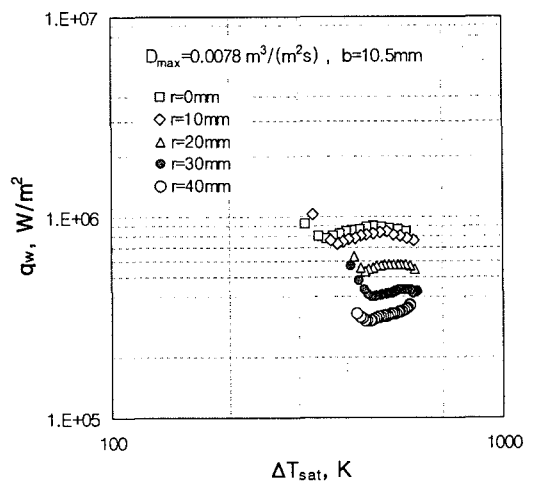


Fig. 4 Cooling curve

의  $r$ 의존성은  $D_{max}$ 가 큰 경우에 있어서 더 크게 나타나고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이  $D_{max}$ 가 감소할수록 분무중심영역과 주변영역의 액적유량밀도의 차이가 점차 작아지는 분무특성 때문인 것으로 판단된다. 이러한 경향은 편평 분무노즐을 이용하여 실험한 Kim et al.<sup>(1,2)</sup>의 연구결과와 동일하며 이 실험결과로부터 분무냉각 열유속은 분무영역과 노즐의 종류에 상관없이 액적유량 밀도에 지배되고 있음을 알 수 있다.



(a)  $D_{max}=0.0179 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$



(b)  $D_{max}=0.0078 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$

Fig. 5 Local heat flux of spray cooling

Fig. 6에는 국소 열전달계수(local heat transfer coefficient)  $h_l (= q_l / \Delta T_{sat})$ 과 분무중심에서의 거리  $r$ 의 관계를 최대 유량밀도를 파라미터로 하여 나타내었다. Fig. 6에서  $h_l$ 은 임의의 위치  $r$ 에서 순수액적에 의한 열전달계수를 나타낸다. 일반적으로 임의의 위치  $r$ 지점에 있어서 분무류에 의한 표면 열유속  $q_w$ 는  $q_l$ (순수액적에 의한 열유속),  $q_a$ (기류에 의한 열유속),  $q_r$ (복사 열유속)의 합으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 아래의 식<sup>(4)</sup>을 이용하여  $q_a$ ,  $q_r$ 을 각각 계산하였으며 이들 값을 이용하여 실험결과로부터  $q_l$ 과  $h_l$ 을 산출하였다.

$$q_r = \epsilon \sigma (T_w^4 - T_a^4) \quad (3)$$

$$q_a = 5.4 Pr^{0.4} k_a (V_a / \nu_a)^{0.5} (T_w - T_a) \quad (4)$$

Fig. 6에서 알 수 있듯이  $0 \leq r \leq 10\text{mm}$ 의 분무중심영역에서의 열전달계수는  $D_{max}$ 가 증가할수록 열전달계수가 큰 폭으로 증가하지만  $r > 30\text{mm}$ 의 주변영역에서는 열전달계수가 거의 변화하지 않고 있다.

Fig. 7, 8에는 분무중심영역과 주변영역에서  $h_l$ 과  $D_r$ 과의 관계를 각각 나타내었다. Fig. 7, 8에는  $D_{max} = 0.002 \sim 0.008 \text{ m}^3 / (\text{m}^2\text{s})$ 의 범위에서 분무중심에서 열전달계수와 액적유량밀도의 관계를 정리한 열전달 상관식<sup>(7)</sup>을 이용하여 계산한 결과를 실선으로 나타내었으며 앞서 설명한 참고문헌의

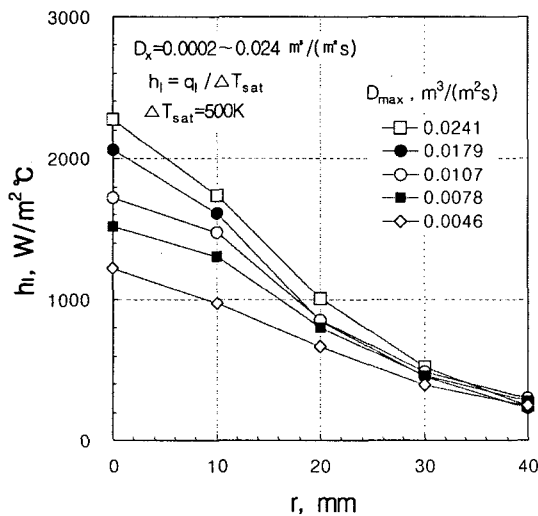


Fig. 6 Distributions of heat transfer coefficient

실험결과<sup>(7,8)</sup>를 병행하여 각각 나타내었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이  $r \leq 10 \text{ mm}$ 인 분무중심영역에서의 실험결과들은 열전달 상관식을 이용한 계산결과와 비교적 잘 일치하고 있으나,  $D_r$ 이  $0.01 \text{ m}^3 / (\text{m}^2\text{s})$ 보다 큰 영역에서의 실험결과는 계산결과보다 다소 작아지는 경향이 있다.

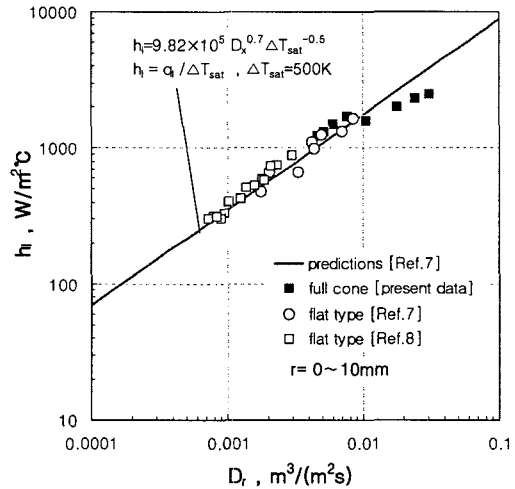


Fig. 7 Correlation of local heat transfer coefficient and local droplet flow rate in the stagnation region

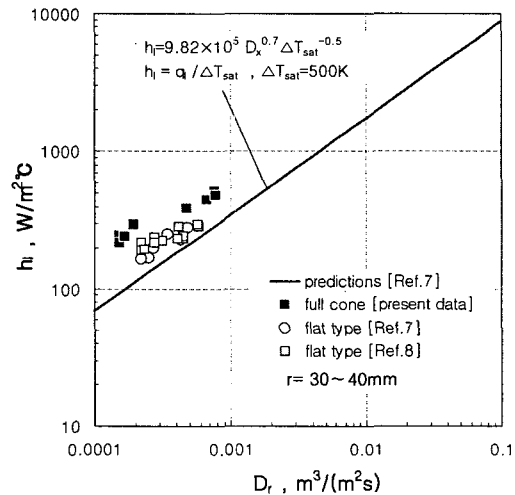


Fig. 8 Correlation of local heat transfer coefficient and local droplet flow rate in the wall region

일반적으로 액적유량밀도가 매우 큰 영역에서는 Fig. 1의 (b)에 나타난 바와 같이 냉각면 표면에 미증발 액적의 잔류로 인해 액막(liquid film)이 형성될 가능성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 이와 같이 냉각면 표면에 액막이 형성될 경우 액적이 냉각면 표면에 직접 충돌하는 것을 방해하여 분무냉각 열전달에 영향을 미치는 것으로 판단된다. Kim et al.<sup>(10)</sup>은 액막류와 간섭하는 분무냉각 열전달에 대한 실험적 연구를 수행하여 분무중심영역에서 액막이 형성될 경우 분무냉각 열전달계수가 다소 저하하는 경향이 있음을 보고하였다. 그러나 현 연구단계에 있어서  $D_r > 0.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 영역에서 분무냉각 열전달 실험결과가 충분하지 않고 또한 액막 형성을 확신할 수 있는 근거가 부족한 상태이므로 이를 확인하기 위해서는 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각한다.

Fig. 8에 나타난  $r \geq 30 \text{ mm}$ 의 주변영역에서의 실험결과와 분무중심영역의 열전달 상관식을 이용한 계산결과는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 특히 분무중심의 액적유량밀도가 가장 큰 분무영역에서 실험한 원추형 노즐의 실험값이 가장 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 분무중심영역에 일차적으로 충돌한 액적이 주변영역으로 이동하여 주변영역의 열전달에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단되며 주로 액적의 리바운드(rebound)<sup>(13)</sup> 또는 액막류의 형성<sup>(10)</sup>에 기인하는 것으로 추정된다.

Kim et al.<sup>(10)</sup>의 연구에서 액적유량이 작은 주변영역에서 액막류가 형성될 경우 이 영역에서의 열전달계수가 다소 증가하고 있음을 보고하였으나 앞서 설명한 바와 같이 현 연구단계에 있어서 분무중심 또는 주변영역에서의 액막류의 형성 여부는 명확히 판단할 수 없는 상황이며 향후 지속적인 연구와 실험이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 2 유체 원추형 분무노즐을 사용하여  $D_{max} = 0.005 \sim 0.03 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 비교적 높은 유량밀도 범위를 대상으로 분무냉각 열전달 실험을 수행하여 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 원추형 분무노즐을 대상으로 한 열전달 실험값은 분무중심영역인  $r \leq 10 \text{ mm}$ 의 범위에서는

기존의 상관식<sup>(7)</sup>을 이용한 계산결과와  $\pm 20\%$  이내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 그러나  $D_r > 0.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 인 비교적 농후한 분무영역에서는 계산결과보다 다소 작아지는 경향이 있으며 이는 냉각면 표면의 액막형성의 영향으로 추정된다. 따라서 분무냉각 열전달 상관식<sup>(7)</sup>은  $D_r \leq 0.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 분무영역에서 적용되어야 할 것으로 판단된다.

(2) 주변영역( $r \geq 30 \text{ mm}$ )에서의 실험값은 분무중심영역에서의 열전달 상관식을 이용한 계산결과보다 다소 높게 나타나고 있으며 분무중심에서의 액적유량밀도가 높을수록 그 차이가 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이는 분무중심영역에 일차적으로 충돌하는 액적이 주변영역으로 이동하여 주변영역의 열전달에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단되며 주로 액적의 리바운드 또는 액막류의 형성에 기인하는 것으로 추정된다.

#### 후 기

이 논문은 2004학년도 안동대학교 국제학술교류보조금에 의하여 연구되었음.

#### 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) Ito, T., Takata, T. and Liu, Z. H., 1989, "Study on the Water Cooling of Hot Surface," *Trans. of JSME*, Vol.55-511, pp. 805~813.
- (5) 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.
- (6) Bernadin, J. D. and Mudawar, I., 1997, "Film Boiling Heat Transfer of Droplet Streams and Sprays," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol.

- 40, pp. 2579~2593.
- (7) 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. 60-574, pp. 2158~2164.
- (8) Kim, Y. C., 2005, "Study on Film Boiling Heat Transfer of Spray Cooling in Dilute Spray Region," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 2, pp. 279~286.
- (9) Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1995, "Spray Cooling with Formation of Liquid Film : Film Boiling Heat Transfer of Liquid Film Flow," *Trans. of the JSME*, Vol. 62-594, pp. 734~739.
- (10) 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. 62-597, pp. 1991~1997.
- (11) Kim, Y. C., 2001, "Study on Minimum Heat Flux Point in Spray Cooling of Hot Plate," *Proceeding of the KSME 2001 Spring Annual Meeting D*, pp. 175~180.
- (12) Kim, Y. C., 2001, "Experimental Study on Minimum Heat Flux Point of Liquid Film Flow," *Proceeding of the KSME 2001 Spring Annual Meeting D*, pp. 208~213.
- (13) 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.
- (14) Kim, Y. C., 2005, "Film Boiling Heat Transfer Model of Spray Cooling Focusing on Rebound Motion of Droplets," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 2, pp. 287~293.
- (15) Beck, J. V., 1970, "Nonlinear Estimation Applied to the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem," *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 703~716.