

< 논문 >

액적 유량과 분무냉각 막비등 열전달의 상관관계에 관한 연구

김 영 찬* · 윤 승 민*

(2006년 9월 14일 접수, 2007년 3월 7일 심사완료)

Study on Correlation of Droplet Flow Rate and Film Boiling Heat Transfer in Spray Cooling

Yeung-Chan Kim and Seung-Min Yun

Key Words : Spray Cooling(분무냉각), Heat Transfer(열전달), Droplet Flow Rate(액적유량), Film Boiling(막비등), Heat Treatment(열처리)

Abstract

A new correlation between the Nusselt number based on modified heat transfer coefficient and Reynold number based on droplet-flow-rate was developed for the experimental data. The modified heat transfer coefficient was defined as ratio of wall heat flux to droplet subcooling. In the previous reports, the local heat flux of spray cooling in the film boiling region was experimentally investigated for the water spray region of $D_{max} = 0.0007 \sim 0.03 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$. In the region near the stagnation point of spray flow, a new heat transfer correlation is recommended which shows good predictions for the water spray region of $D_x \leq 0.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$.

기호설명

<p>D_x : x 위치에서의 액적유량밀도 [$\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$]</p> <p>$D_{max}$: 분무중심에서의 액적유량밀도 [$\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$]</p> <p>$d_m$: 액적의 평균직경 [m]</p> <p>h_l : 열전달계수 [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$], $q_l / \Delta T_{sat}$</p> <p>h_s : 열전달계수 [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$], $q_l / \Delta T_{sub}$</p> <p>k_a : 공기의 열전도계수 [W/mC]</p> <p>k_d : 액체의 열전도계수 [W/mC]</p> <p>Nu_d^* : Nusselt 수, $(h_s \cdot d_m) / k_d$</p> <p>Re_d : Reynold 수, $(\rho D d_m) / \mu_d$</p>	<p>Pr_f : 액체의 Prandtl 수</p> <p>q_w : 전체 열유속 [W/m^2]</p> <p>q_l : 액적 충돌에 의한 열유속 [W/m^2]</p> <p>SMD : Sauter Mean Diameter [μm]</p> <p>T_a : 주위 공기온도 [$^{\circ}\text{C}$]</p> <p>T_d : 액적의 온도 [$^{\circ}\text{C}$]</p> <p>T_w : 냉각면의 표면온도 [$^{\circ}\text{C}$]</p> <p>V_a : 기류의 속도 [m/s]</p> <p>x : 분무중심에서의 거리 [mm]</p> <p>ρ : 액체의 밀도 [kg/m^3]</p> <p>μ_d : 액체의 점성계수 [kg/ms]</p> <p>ΔT_{sat} : 전열면의 과열온도 [$^{\circ}\text{C}$], $T_w - T_{sat}$</p> <p>ΔT_{sub} : 액적의 과냉도 [$^{\circ}\text{C}$], $T_{sat} - T_d$</p>
--	--

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

1. 서론

액체를 미립화하여 고온의 물체를 냉각시키는 분무냉각기술은 금속재료의 열처리뿐만 아니라 고밀도 전자장비, 고성능 소형 열교환기의 냉각 등 다양한 분야로 그 활용범위를 넓혀가고 있다. 분무냉각 열전달특성은 잘 알려진 바와 같이 액체의 비등곡선과 유사한 N자형 곡선을 나타내고 있으며 열전달특성이 서로 다른 핵비등영역, 천이영역, 막비등영역으로 구분된다. 그리고 핵비등영역과 천이영역의 경계에 한계열유속점(CHF), 그리고 천이영역과 막비등영역의 경계에 최소열유속점(MHF)이 존재하는 것으로 알려져 있다. 이러한 영역 중에서도 막비등영역의 분무냉각 열전달특성과 MHF점은 금속재료의 열처리에서 매우 중요하며 현재까지 이와 관련된 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나 분무냉각 열전달에 관여하는 인자가 매우 많고 또한 액적이 냉각면에 충돌하는 과정에서의 현상이 매우 복잡하여 현재까지 산업현장에서 일반적으로 적용할 수 있는 열전달 모델 또는 열전달 상관식이 명확히 정립되어 있지 않은 상황이다. 현재까지의 연구결과로부터 액적의 유량밀도가 분무냉각 열전달에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 밝혀졌으며, 많은 연구자들에 의해 $q_i \propto D^n$ 의 형태로 표현되는 열전달 상관식이 제안되었다. 여기서 D 는 액적유량밀도이며 단위시간 및 단위면적에 공급되는 액적의 유량으로 정의한다. 그러나 n 값은 0.3~1의 범위에서 각 연구자⁽¹⁻⁴⁾마다 다르게 나타나고 있어 열전달 상관식의 활용에 많은 어려움이 있는 것으로 판단된다.

본 연구의 저자는 가압식 편평 분무노즐(flat spray nozzle)을 이용하여 $D_{max}=0.002\sim 0.008$ m³/(m²s)의 분무영역을 대상으로 실험을 수행하여 $h_i \propto D^{0.7} \Delta T_{sat}^{-0.5}$ 의 형태로 표현되는 열전달 상관식을 제안하였다.⁽⁴⁾ 그리고 후속 연구⁽⁵⁻⁶⁾에서는 2유체(twin fluid) 분무노즐을 이용하여 $D_{max}=0.0007\sim 0.003$ m³/(m²s)의 비교적 희박한 분무영역과 $D_{max}=0.004\sim 0.03$ m³/(m²s)의 농후한 분무영역을 대상으로 연구를 수행하여 액적의 유량밀도와 액적의 크기가 다른 분무영역에서도 최초 제안한 열전달 상관식이 분무냉각 열전달률의 예측을 위해 활용될 수 있음을 확인하였다. 그러나 위에서 언급한 열전달 상관식은 실험에서 얻은 열전달률과 액적

유량과의 관계를 단순 정리한 결과이며, 이 상관식에는 액적의 온도, 크기와 같은 중요 열전달 요소들이 반영되어 있지 않아 이러한 요소들을 포함한 열전달 상관식에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Nu_d^* 와 Re_d 와 같은 무차원수를 이용하여 위에서 언급한 분무냉각 열전달 실험결과들을 정리하고자 한다. 특히 본 연구에서는 일반적으로 산업현장에서 실온에 가까운 액체를 분무냉각에 사용하는 것을 고려하여 액체의 과냉도(subcooling), ΔT_{sub} 에 기초한 Nusselt 수($=h_s \cdot d_m / k_d$)를 이용하여 실험결과들을 정리하였다. Wang and Shi⁽⁷⁾는 ΔT_{sub} 에 기초한 Nusselt 수를 이용하여 단상류(single phase flow)의 강제대류 열전달식과 유사한 강제대류 막비등 열전달에 관한 상관식을 제안하였으며, 과냉도가 비교적 큰 액체인 경우 막비등 열전달은 액체의 온도상승에 대부분이 소비되고 있음을 주장하였다. 또한 두께가 5mm 이하의 얇은 액막류(liquid film flow)에 대한 막비등 열전달에 관한 실험⁽⁸⁾에서도 Wang and Shi와 유사한 결론을 얻을 수 있었다. 이와 같은 연구결과는 비교적 과냉도가 큰 액체를 사용하는 분무냉각 막비등 열전달에 있어서도 적용할 수 있는 것으로 판단된다. 막비등영역의 분무냉각에 있어서 액적은 전열면에 충돌 직후 Fig. 1에 나타난 바와 같이 원판 모양을 유지하는 동안에 전열면과 액적사이에 형성되는 얇은 증기막을 통해 열이 전달되는 것으로 가정할 수 있으며, 액체의 과냉도가 비교적 큰 경우 전열면에서의 열전달은 액체의 온도 상승에 소비되는 현열이동이 열전달의 대부분을 차지하는 것으로 알려져 있다.⁽⁷⁻⁹⁾

본 연구에서는 이러한 연구결과들에 기초하여 저자의 선행연구⁽⁴⁻⁶⁾에서 다양한 분무노즐을 사용하여 획득한 분무냉각 열전달 실험결과들을 Nu_d^* 와 Re_d 에 대하여 정리하여 액적유량, 액적의 온도 및 평균크기와 분무냉각 열전달률과의 상관관계를 검토하고자 한다.

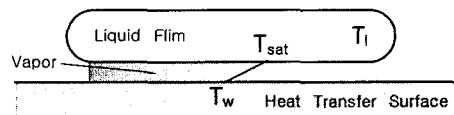


Fig. 1 Heat transfer model of droplet in spray cooling

2. 분무냉각 열전달 상관식의 정리

2.1 무차원수 Nu_d^* 와 Re_d

본 연구에서는 ΔT_{sub} 를 이용한 무차원수 Nu_d^* 와 액적의 유량밀도를 이용한 Re_d 를 이용하여 선행 실험결과들을 정리하였다. 무차원수 Nu_d^* 와 Re_d 의 정의는 다음과 같다.

$$Nu_d^* = h_s \cdot d_m / k_d, \quad h_s = q_l / \Delta T_{sub} \quad (1)$$

$$Re_d = \rho \cdot D \cdot d_m / \mu_d \quad (2)$$

액적의 충돌과정에 있어서 대부분의 열전달은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 액적 하부에 형성된 증기와 액적의 경계면으로부터 열전달에 의해 발생하는 것으로 가정할 수 있다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 Wang and Shi⁽⁷⁾ 등의 연구결과에 기초하여 막비등영역의 분무냉각에 있어서 액체의 과냉도가 비교적 큰 경우 열전달은 액체의 온도 상승에 소비되는 현열이동이 열전달의 대부분을 차지하는 것으로 가정하였으며, 이 경우 ΔT_{sub} 를 이용한 무차원수 Nu_d^* 를 이용하여 분무냉각 열전달 상관식을 정리하는 것이 매우 효과적인 것으로 판단된다. 또한 강제대류 열전달에서는 액체의 평균 흐름속도에 기초한 Reynold 수를 이용하여 열전달 상관관계를 정리하는 것이 일반적이지만 분무냉각 열전달에서는 식 (2)에 나타낸 바와 같이 분무냉각 열전달에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 액적유량밀도에 기초한 Reynold 수를 이용하여 열전달 상관관계를 정리하였다.

2.2 분무중심영역에서의 분무냉각 열전달

Fig. 3에는 분무냉각 열전달에 관한 대표적인 선행 연구결과들⁽¹⁻⁶⁾을 비교하여 나타내었다. 다른 연구자들의 분무냉각 열전달 상관식⁽¹⁻⁴⁾을 이용하여 분무냉각 열전달계수를 산출함에 있어서 기류에 의한 열전달 평가방법, 적용 가능한 분무영역 등이 서로 상이하여 상호 비교에 어려움이 있을 것으로 생각되지만 전반적으로 분무냉각 열전달의 액적유량에 대한 의존성은 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4에는 분무중심영역($x=0\sim 10\text{mm}$)에서는 저자의 선행 실험결과들⁽⁴⁻⁶⁾을 무차원수 (Nu_d^* / Pr_f)와 Re_d 를 이용하여 정리한 결과를 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions⁽⁴⁻⁶⁾

	Nozzle Type	flat
Ref.[4]	D_{max} (m ³ /m ² s)	0.002~0.008
	SMD(μm)	≈ 200
	V_a (m/s)	10~12
Ref.[5]	Nozzle Type	flat
	D_{max} (m ³ /m ² s)	0.0007~0.003
	SMD(μm)	≈ 100
Ref.[6]	V_a (m/s)	10~20
	Nozzle Type	full cone
	D_{max} (m ³ /m ² s)	0.004~0.025
Ref.[6]	SMD(μm)	≈ 100
	V_a (m/s)	20~25

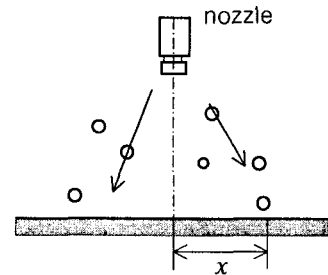


Fig. 2 Schematic of heat transfer plate

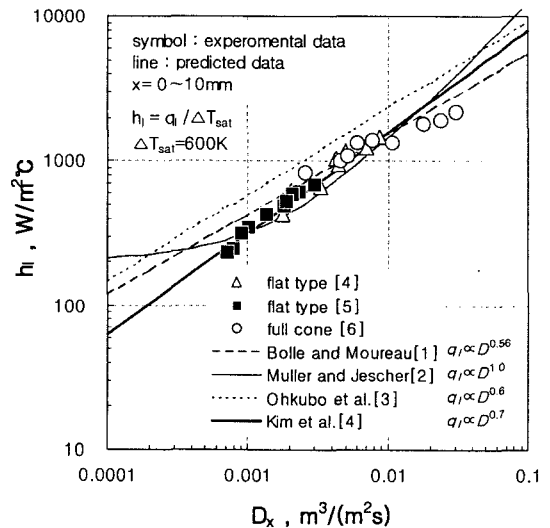


Fig. 3 Correlation of h_l and D_x in the region near the stagnation point of spray flow ($x=0\sim 10\text{mm}$)⁽¹⁻⁶⁾

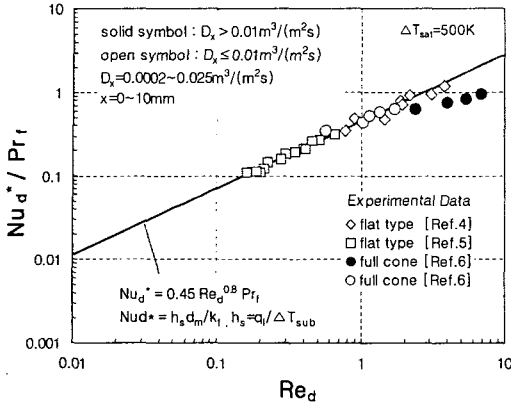


Fig. 4 Correlation of Nu_d^* and Re_d in the region near the stagnation point of spray flow ($x=0\sim 10\text{mm}$)

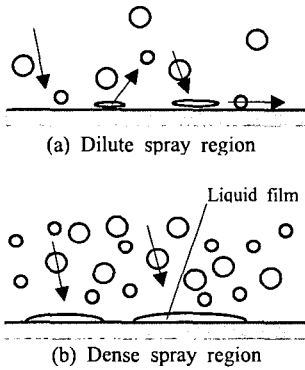


Fig. 5 Liquid film formation in spray cooling

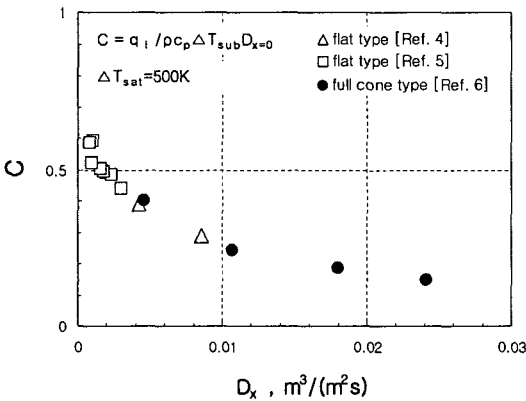


Fig. 6 Estimated values of C at stagnation point of spray flow ($\Delta T_{sat}=500\text{K}$)

Table 1에 나타난 바와 같이 선행연구^(4,5)에서는 편평노즐을 사용하였으며 선행연구⁽⁶⁾에서는 원추형 노즐을 사용하여 각각 분무냉각 열유속을 측정하였다. x 는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 분무중심에서의 거리를 의미한다. Fig. 4에는 국소액적 유량밀도, $D_x=0.0002\sim 0.025\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 실험값을 정리하여 나타내었으며, D_x 가 $0.01\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 보다 큰 영역의 실험값을 기호(●)로 나타내었다. Fig. 4에 나타난 실선은 D_x 가 $0.01\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 보다 작은 영역에서의 실험결과만을 대상으로 (Nu_d^*/Pr_f)와 Re_d 와의 관계를 정리한 결과이며, 그림으로부터 D_x 가 $0.01\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 보다 큰 영역의 실험값을 제외한 실험값들은 $\pm 25\%$ 의 오차범위에서 아래의 상관식을 이용하여 잘 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

$$Nu_d^* = 0.45 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr_f \quad (3)$$

그러나 D_x 가 $0.01\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 보다 큰 분무영역의 실험값은 식 (3)을 이용한 계산결과보다 다소 작아지는 경향이 있음을 알 수 있다. 일반적으로 액적유량밀도가 매우 큰 영역에서는 Fig. 5의 (b)에 나타난 바와 같이 냉각면 표면에 미증발 액적의 잔류로 인해 액막이 형성될 가능성이 매우 높은 것으로 알려져 있으며, 냉각면 표면에 액막이 형성될 경우 액적이 냉각면 표면에 직접 충돌하는 것을 방해하여 분무냉각 열전달에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 일반적으로 분무액적의 과냉도가 비교적 커서 액적의 증발에 소비되는 열유속을 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정할 경우, 분무냉각 열유속은 충돌액적의 온도 상승에 소비되는 현열이동에 비례하며 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$q_l = C \rho c_p \Delta T_{sub} D_x \quad (4)$$

여기서 C 는 비례상수이며 C 가 클수록 분무냉각에 있어서 액적 충돌시 액적으로의 열전달 효율이 증가하고 있음을 의미한다.

Fig. 6에는 분무중심($x=0$)에서의 열유속 측정결과들을 식 (4)를 이용하여 정리한 결과를 나타내었으며, 그림에서 알 수 있듯이 D_x 가 비교적 작은 분무영역에서는 $C \approx 0.5$ 에 가까운 값을 나타내고 있으나 D_x 가 증가할수록 C 는 점차 감소하고 있다. 참고로 Shoji et al.⁽¹⁰⁾의 연구에서 C 값은 비

교적 과냉각도가 큰 액적의 경우에는 액적의 충돌속도, 크기 등에 영향을 거의 받지 않는 일정한 값으로 가정하였으며, 실험을 수행하여 $C \approx 0.5$ 의 값을 얻을 수 있었다. 이러한 연구결과는 본 연구에 있어서 비교적 작은 분무유량을 대상으로 한 실험결과와 거의 일치하고 있다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이 분무유량이 커질수록 C 는 점차 감소하고 있으며 이는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 액적유량이 증가할수록 냉각면 표면에 형성되는 액막의 영향으로 액적 충돌시 열전달 효율이 저하되기 때문인 것으로 추정된다. 현 연구단계에 있어서 $D_x \geq 0.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 영역에서 C 와 D_x 와의 상관관계를 정리할 수 있는 실험결과가 충분하지 않고 또한 액막형성을 확신할 수 있는 근거가 부족한 상태이므로 향후 이에 대한 지속적인 연구와 실험이 필요할 것으로 생각한다.

Fig. 7에는 $x \geq 30 \text{ mm}$ 의 영역에서 (Nu_d^* / Pr_f) 와 Re_d 의 관계를 정리한 결과를 나타내었다. 그림에는 분무중심영역의 열전달 상관식(3)을 이용한 계산결과는 실선으로 나타내었으며 주변영역의 실험결과에 기초한 열전달 상관식을 점선으로 나타내어 각각의 영역에서의 실험결과와 상호 비교하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 주변영역에서의 실험결과와는 식(3)을 이용한 계산결과보다 약간 큰 값을 나타내고 있으며, 이는 분무중심영역에 일차적으로 충돌하는 액적이 주변영역으로 이동하여 주변영역의 열전달에 영향을 미치기 때문인 것으로 추정된다. 고온 평판의 분무중심영역에 일차적으로 충돌한 액적은 롤링(rolling)⁽¹¹⁾ 리바운드(rebound)⁽⁹⁾ 또는 액막류의 형성⁽¹²⁾에 의해 주변영역으로 이동할 것으로 판단되며, 이러한 방법으로 이동된 액적유량은 앞서 설명한 바와 같이 주변영역의 열전달에 영향을 미치는 것으로 추정된다.

Fig. 8에는 분무중심영역에서 전열면의 과열온도(ΔT_{sat})를 파라미터로 (Nu_d^* / Pr_f) 와 Re_d 의 관계를 정리하여 나타내었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 분무중심영역에서의 실험값들은 전열면의 과열온도가 다소 변화하여도 식(3)을 이용한 계산결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

3. 결론

본 연구에서는 선행연구⁽⁴⁻⁶⁾에서 다양한 분무노

즐을 사용하여 획득한 분무냉각 열전달 실험결과들을 ΔT_{sub} 를 이용한 무차원수 Nu_d^* 와 액적의 유량밀도를 이용한 Re_d 를 이용하여 정리하였다. 그 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 편평노즐, 원추형 분무노즐을 대상으로 한 열전달 실험값은 분무중심영역인 $x \leq 10 \text{ mm}$ 의 범위에서는 식(3)을 이용하여 비교적 잘 정리할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 D_x 가 $0.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 보다 큰 분무영역의 실험값은 식(3)을 이용한 계산결과보다 다소 작아지는 경향이 있다.

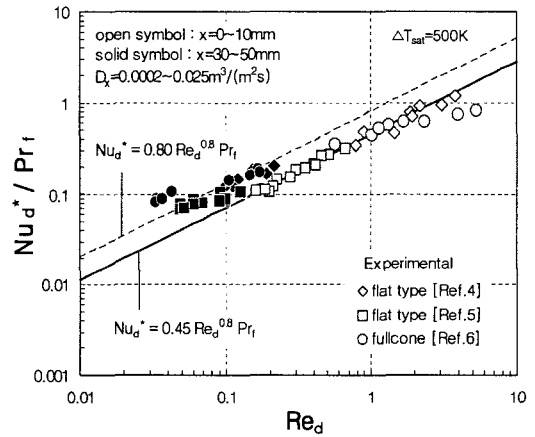


Fig. 7 Correlation of Nu_d^* and Re_d in the wall region of spray flow ($x=30-50\text{mm}$)

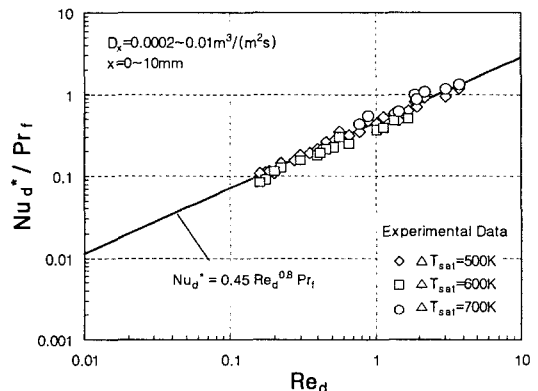


Fig. 8 Correlation of Nu_d^* and Re_d at stagnation point of spray flow (effect of surface superheat)

또한 분무중심영역에서 식 (4)를 이용한 계산결과로부터 D_x 가 증가할수록 충돌액적에 의한 열전달효율이 점차 감소하고 있음을 확인하였으며, 이는 냉각면 표면의 액막형성의 영향으로 추정된다. 따라서 Nu_d^* 와 Re_d 를 이용하여 얻은 열전달 상관식 (3)은 $D_x \leq 0.01 \text{ m}^2 / (\text{m}^2 \text{ s})$ 의 분무영역에서 적용되어야 할 것으로 판단된다.

(2) 주변영역($x \geq 30 \text{ mm}$)에서의 실험값은 분무중심영역에서 얻은 열전달 상관식에 의한 계산결과보다 다소 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이는 분무중심영역에 일차적으로 충돌하는 액적이 주변영역으로 이동하여 주변영역의 열전달에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Bolle, L. and Moureau, J. C., 1978, "Spray Cooling of Hot Surface," *Multiple Science and Technology*, pp. 76~90.
- (2) Müller, H. and Jescher, R., 1973, "Investigation of the Heat Transfer in a Simulated Secondary Cooling Zone in the Continuous Casting Process," *Arch Eisenhüttenwes*, Vol.44-8, pp. 589~594.
- (3) Ohkubo, H. and Nishio, S., 1990, "Study on Accurate Prediction of Heat Transfer Characters of Mist Cooling," *JSME International Journal*, Vol. 33-2, pp. 326~33.
- (4) 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.
- (5) Kim, Y. C., 2005, "Study on Film Boiling Heat Transfer of Spray Cooling in Dilute Spray Region," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29-2, pp. 279~286.
- (6) Kim, Y. C., 2006, "Study on Film Boiling Heat Transfer of Spray Cooling in Air-Water Full Cone Spray System," *Proceeding of the KSME 2006 Spring Annual Meeting*, pp. 2611~2616.
- (7) Wang, B. X. and Shi, D. H., 1985, "A Semi-empirical Theory for Forced-flow Turbulent Film Boiling of Subcooled Liquid along a Horizontal Plate," *Int. J. of Heat & Mass Transfer*, Vol. 28-8, pp. 1499~1505.
- (8) Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1996, "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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.