

< 기술논문 >

희박 분무영역에서의 분무냉각 막 비등 열전달에 관한 연구

김 영 찬*

(2004년 9월 16일 접수, 2004년 12월 10일 심사완료)

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(막 비등), Heat Treatment(열처리), Dilute Spray(희박분무), Droplet Flow Rate(액적유량밀도)

Abstract

This study presents experimental results on the heat transfer coefficients in the film boiling region of spray cooling for actual metallurgical process. In this study, the heat flux distributions of a two dimensional dilute spray impinging on a hot plate were experimentally investigated. A stainless steel block was cooled down from initial temperature of about 800°C by twin fluid (air-water) flat spray. It was found from the experimental results that the heat transfer area was classified into the stagnation region and wall-flow region. In the stagnation region, the experimental data of local heat transfer coefficient was closely correlated with the local droplet-flow-rate supplied from the spray nozzle directly. Thus, the local heat transfer coefficients are in good agreement with the predicted values from the correlations proposed by our previous study. In wall-flow region, however, remarkable differences are observed between experimental data and predicted values because the number of rebound droplets increase with increasing the distance from the stagnation point.

기호설명

- D_x : x축 방향의 액적유량밀도 [$m^3/(m^2s)$]
- D_y : y축 방향의 액적유량밀도 [$m^3/(m^2s)$]
- D_{max} : 분무중심에서의 액적유량밀도 [$m^3/(m^2s)$]
- h : 열전달계수 [$W/m^2\cdot^\circ C$]
- k : 열전도계수 [$W/m\cdot^\circ C$]
- q_w : 표면 열유속 [W/m^2]
- T_a : 주위 공기온도 [$^\circ C$]
- T_w : 냉각면의 표면온도 [$^\circ C$]
- x : 분무중심에서의 거리 [mm]
- ΔT_{sat} : 전열면의 과열온도, $T_w - T_{sat}$

1. 서론

금속 재료의 가공·열처리 (thermo-mechanical control process)에서는 재료의 성질을 제어하기 위해 가속 냉각을 소정의 온도에서 정지할 필요가 있으나 이때에 냉각영역(cooling zone)의 출구에 있어서 재료의 온도가 불균일하게 되는 냉각 불안정 현상이 큰 문제점으로 지적되고 있다. 특히 이러한 냉각 불안정 현상은 주로 액적 유량의 불균일, 표면에서의 액막 형성 등으로 인한 열전달률의 불균일에 기인하는 것으로 알려져 있다. 그 결과 생산된 재료는 내부성질의 불균일, 잔류응력의 발생 등으로 인해 품질이 크게 저하되는 경향을 보이고 있으며 이러한 가공·열처리과정에서 발생하는 문제점을 해결하고자 현재까지 분무 냉각에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다.⁽¹⁻¹⁰⁾

* 회원, 안동대학교 기계공학부

E-mail : yeung @ andong.ac.kr

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

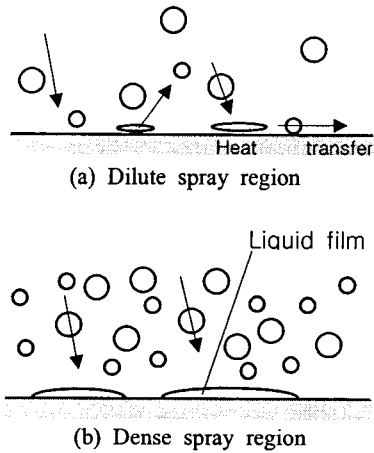


Fig. 1 Liquid film formation in spray cooling

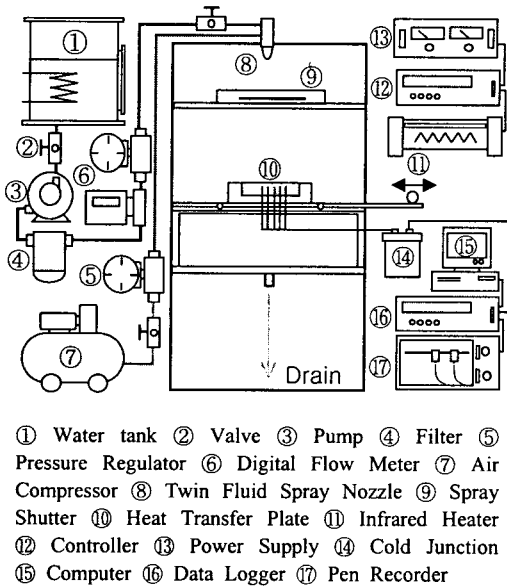


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

Kim et al.⁽¹⁻⁵⁾는 지난 연구에서 액적의 유량밀도가 0.002~0.02 m³/(m²s)의 비교적 농후한 영역을 대상으로 분무냉각 열전달 실험을 수행하여 열전달 상관식⁽¹⁾과 MHF (minimum heat flux) 점⁽⁴⁾에 대한 기초정보를 제공하였으며, 또한 Fig. 1의 (b)에 나타난 바와 같이 냉각면 표면에 형성되는 액막의 영향을 규명하기 위한 실험적 연구^(2,3,5)를 수행하였다. 그리고 실험결과에 기초하여 액적의 리바운드모션 (rebound motion)과 현열이동 (sensible

heat transfer)에 주목한 고온영역에서의 분무냉각 열전달 모델을 수립하였다.⁽⁶⁾ 그러나 이러한 일련의 연구에도 불구하고 분무냉각 열전달에 관한 많은 부분이 불명확한 상태로 남아 있으며, 특히 좀더 다양하고 넓은 범위의 분무조건에서 분무냉각 열전달 실험을 수행하여 상세한 연구결과들의 신뢰성을 확인할 필요가 있는 것으로 판단된다.

본 연구는 분무냉각 열전달에 관한 후속 연구로써 국소 유량밀도가 0.0002~0.003 m³/(m²s)의 범위이고 액적의 크기가 100 μm 이하인 비교적 희박한 분무영역에서 열전달 실험을 수행하여 지난 연구에서 제안한 열전달 관계식의 신뢰성을 확인하고자 한다. 분무유량과 액적의 크기가 작은 희박 분무영역에서는 Fig. 1의 (a)에 나타난 바와 같이 액막이 형성되기 어려우며 복사 및 기류에 의한 열전달 비율이 증가하게 되어 이 영역에서는 기류와 복사 열전달의 정확한 평가가 매우 중요할 것으로 생각된다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 2에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험장치는 크게 나누어 ① 냉각속도의 측정이 가능한 냉각면과 열전대, ② 분무노즐 및 부대장치, ③ 적외선 가열장치, ④ 데이터 기록 및 처리장치 등으로 구성되어 있다. 본 실험장치의 기본적인 구성은 기존의 연구⁽¹⁾와 거의 유사하지만 분무노즐, 냉각면을 포함한 모든 부분을 완전히 새롭게 제작하였으며 이러한 부분들에 대해 간략히 설명하기로 한다. 지난 연구에서 가압식 분무노즐을 사용한 것과는 다르게 본 연구에서는 2 유체 편평 분무노즐 (twin fluid flat spray nozzle, Ikeuchi BIMV)을 사용하였다. 2 유체 노즐은 주로 공기를 가압하여 액체를 미립화하는 방식으로 액적의 평균 입경이 비교적 작고 낮은 액적유량밀도의 실험조건에 매우 적절한 노즐이라고 판단되며 본 실험에서는 공기압과 액압을 적절히 조절하여 다양한 형태의 액적유량밀도 분포를 표현할 수 있도록 하였다.

2.1 액적유량밀도의 측정

본 연구에서는 D_x, D_y 및 액적의 온도를 측정하였으며 냉각액체는 물을 사용하였다. 본 실험에서는 앞서 설명한 바와 같이 2 유체 편평 분무

노즐을 사용하였으며 편평 노즐 (flat spray nozzle) 은 일반적으로 x 방향으로서는 현저한 유량밀도 분포를 가지고 있으나 y 방향으로서는 거의 분포가 존재하지 않고 액적유량밀도가 일정하게 나타나는 2차원적인 특징을 가지고 있다. 냉각면에 공급되는 액적의 유량분포는 내경 3.3 mm의 유리관을 이용하여 측정하였으며 이 유리관은 x, y 방향으로 여러 개를 아크릴판에 부착하여 한번에 다수의 측정치를 얻을 수 있도록 제작하였다. 또한 Fig. 3에 나타난 바와 같이 액적포집용 유리관을 아크릴판의 평면 위치보다 25 mm 높게 설정함과 동시에 스펀지를 표면에 설치하여 액적이 아크릴판에 충돌한 후 튀어 올라 유리관에 포집되는 현상으로 인해 발생될 수 있는 측정오차를 최소로 하였다. 노즐을 통과하는 전체유량 Q_d 는 액체를 펌프를 이용하여 가압함과 동시에 공기압을 변화시킴으로써 조절할 수 있도록 하였다. 본 연구가 대상으로 한 전체유량 Q_d 의 범위는 0.13~2.17 l/min이며, 분무중심에서의 D_{max} 값은 0.0007~0.003 m/(m²)의 비교적 낮은 유량밀도 범위에서 실험을 수행하였다. 이러한 조건에 해당되는 공기압의 범위는 100~400 kPa이며, 액압의 범위는 100~200 kPa이다. 액적온도는 약 25°C로 설정하여 실험을 수행하였다.

2.2 냉각면의 구조 및 온도측정

본 실험에서는 초기온도 800°C 정도의 수평 냉각면에 액적을 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 가열된다. 냉각면은 Fig. 4에 나타난 동일한 재료로 제작된 고정틀에 볼트로 고정되어 있으며 냉각면과 고정틀 사이, 냉각면의 후면 등에는 단열성이 우수한 세라믹 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 배려하였다. 홈은 와이어(wire) 방전가공을 이용하여 제작하였으며 홈 내부에는 세라믹계 단열재를 삽입하였다. 또한 냉각면에는 x 방향으로 5개의 열전대를 냉각면 표면에서부터 약 2 mm의 위치

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, 국소 열유속, 국소 열전달률을 계산하였다. 사용한 열전대는 K type이며 고온에도 견딜 수 있는 외경 0.9 mm의 sheath형 열전대를 주문 제작하여 사용하였다. 또한 열전대는 지정된 위치에 밀착되어 온도를 측정할 수 있도록 스프링을 장착하였으며 산화방지 및 측온부의 열적 접촉을 보존하기 위해 각각의 열전대 삽입용 구멍에는 고온용 윤활유를 충전하였다.

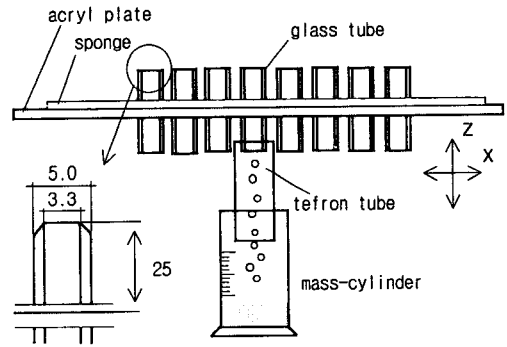


Fig. 3 Measurement of droplet flow rate

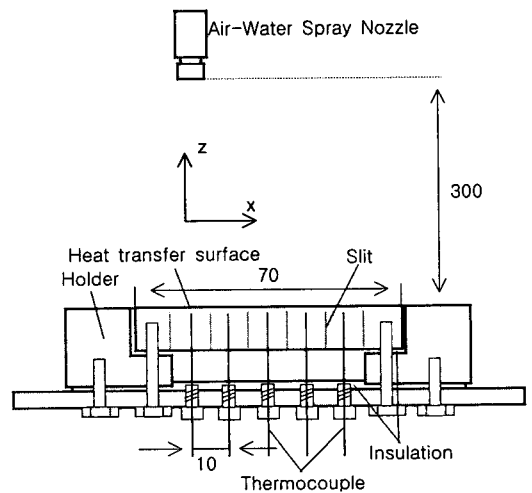


Fig. 4 Schematic of heat transfer plate

3. 실험결과 및 고찰

3.1 액적유량밀도의 측정결과

Fig. 5에 본 연구에서 사용된 분무노즐에 대한 x 방향의 액적유량밀도 분포를 나타내었다. 그림에는 무차원 액적유량밀도 ($=D_x/D_{max}$)를 무차원 x 방향거리($=x/b$)에 대하여 나타내었으며 b 는 상수이다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 편평 노즐을 사용하였으며 이러한 노즐을 사용할 경우 y 방향으로의 액적유량밀도를 거의 일정하게 나타낼 수 있다. 즉 그림에는 나타내지 않았으나 y 방향으로의 액적유량밀도 분포는 본 연구의 측정범위 내에서 분무중심($x=0$)에서의 D_{max} 와 거의 동일함을 알 수 있었다. 본 실험에서 사용한 2 유체 편평 노즐에 대한 x 방향의 액적유량밀도 분포는 다음의 식으로 나타낼 수 있었다.

$$D_x / D_{max} = \exp [-0.693 (x/b)^{1.5}] \quad (1)$$

$$b = 2 \times 10^6 D_{max}^2 - 14107 D_{max} + 39.9 \quad (2)$$

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

3.2 측정값의 오차추정

본 연구에서는 Fig. 6에 나타낸 것과 같은 냉각면 내부의 온도 측정값에 기초하여 Beck⁽¹¹⁾이 제안한 열전도 역산법 (inverse method)과 동일한 방법을 이용하여 냉각면의 표면온도 및 열유속을 계산하였다. Fig. 6에는 $D_{max} = 0.00298 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 일 경우에 있어서 표면으로부터 2 mm 지점에 위치한 열전대를 이용하여 냉각과정에서의 온도이력을 측정된 대표적인 실험결과를 나타내었으며, 이러한 온도 측정값을 1차원 열전도 역산법에 적용하여 냉각면의 표면온도 및 열유속을 계산하였다. 이러한 방법을 이용하여 표면온도 및 열유속을 계산할 때에 열전대의 위치와 온도측정의 시간간격은 실험오차에 큰 영향을 미칠 수 있으며 본 연구에서는 본 실험에 앞서 이러한 실험오차에

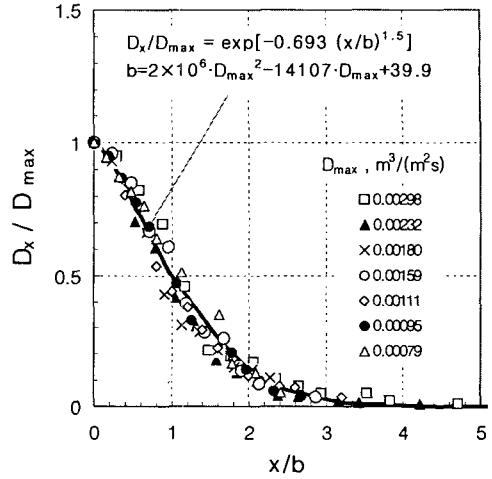


Fig. 5 Distributions of droplet flow rate

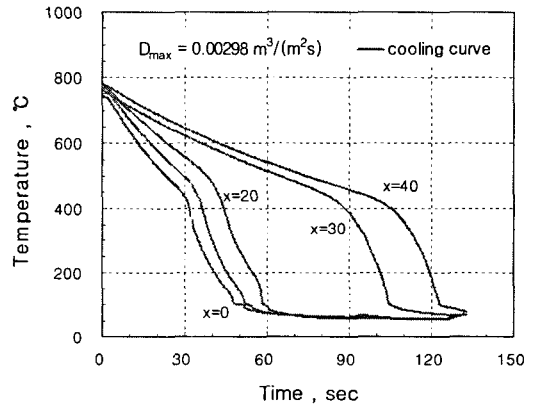


Fig. 6 Cooling curve

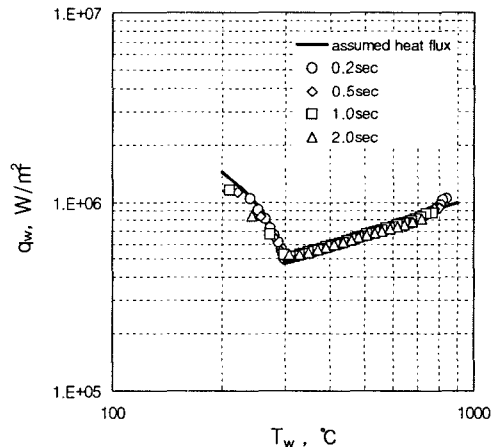


Fig. 7 Error estimation

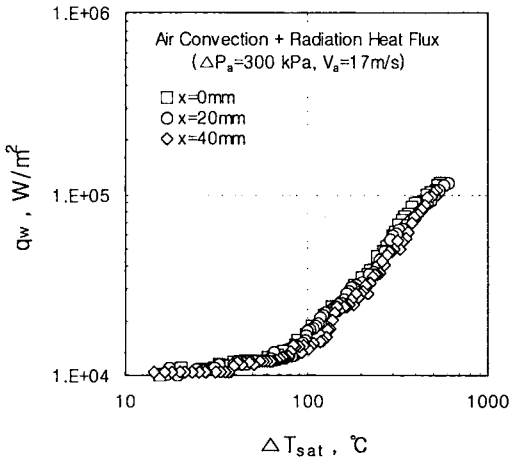


Fig. 8 Experimental result of forced convection and radiation heat transfer

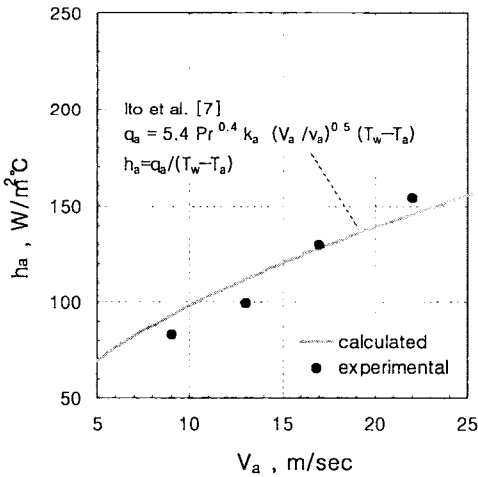


Fig. 9 Comparison between experimental data and calculated results of convective heat transfer

대해 검토하였다. Fig. 7에는 MHF 점을 포함한 막 비등 영역에 있어서 추정되는 실험오차를 계산하여 나타내었다. 실험오차의 추정방법은 우선 실험에 이용한 냉각면과 동일한 두께, 재질의 냉각면의 초기온도를 약 800°C로 설정하여 이 냉각면 표면에 Fig. 7에 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 가정된 임의의 열유속 q_w 와 비교하여 실험오차를 추정하였다. Fig. 7에서 알 수

있듯이 막 비등 영역에서는 온도측정의 시간간격이 2초 이하에서 처음 가정된 열유속 q_w 와 역산법을 이용하여 계산한 열유속(기호로 표시)은 매우 잘 일치하고 있다. 또한 냉각면은 x, y 방향의 열전달을 방지하기 위해 폭 0.5 mm의 홈을 가공하였으나 Fig. 4에 나타낸 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 오차는 $\pm 3\%$ 이내였음을 확인하였다.

3.3 기류(Air flow) 및 복사에 의한 열전달

분무유량이 비교적 적은 영역에서는 충돌액적에 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 열유속은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서 q_w 는 전체 열유속, q_l 은 분무액적에 의한 열유속, q_a 는 기류에 의한 열유속, q_r 은 복사에 의한 열유속을 각각 나타낸다. 본 연구에서 복사 열유속 q_r 과 기류에 의한 열유속 q_a 의 계산에는 각각 다음의 식⁽⁷⁾을 참고하였다.

$$q_r = \epsilon \sigma (T_w^4 - T_a^4) \tag{4}$$

$$q_a = 5.4 Pr^{0.4} k_a (V_a / v_a)^{0.5} (T_w - T_a) \tag{5}$$

여기서 Pr, k_a, v_a 는 공기의 Prantl 수, 열전도계수 및 동점성계수, V_a 는 기류속도를 나타낸다.

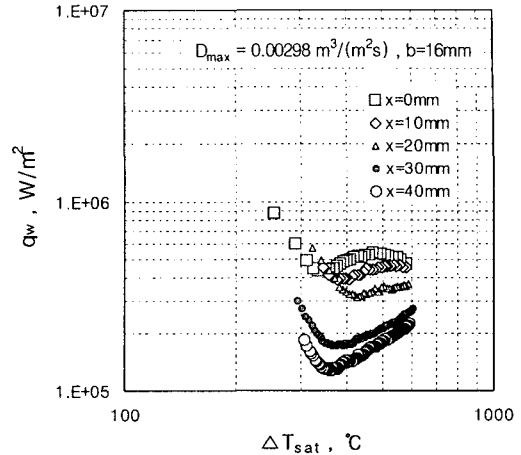
본 연구에서 순수 액적에 의한 열유속을 산출하기 위해서는 기류 및 복사 열유속 그리고 실험 중 발생하는 손실 열유속을 명확히 파악할 필요가 있으며 이를 위해 별도의 실험을 수행하였다.

Fig. 8에는 공기만을 약 300 kPa 정도로 가압하여 기류 및 복사에 의한 냉각실험을 수행한 결과를 나타내었다. 그리고 냉각면의 측면과 후면으로부터의 열손실을 측정하기 위해 두께 40 mm 정도의 세라믹계 단열재를 이용하여 냉각면 표면을

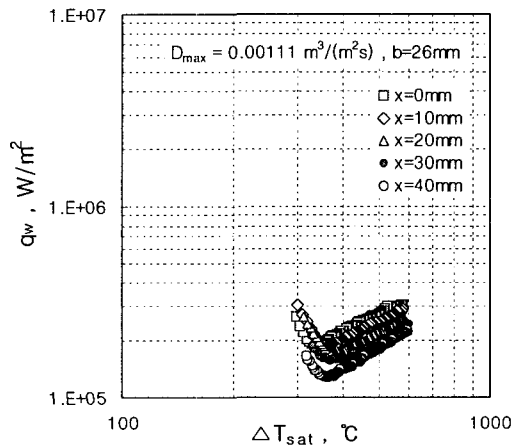
완전히 단열한 후 자연 냉각시켜 손실 열유속을 구하였다. 이러한 열전달 실험들을 통하여 순수 기류에 의한 열전달률을 실험적으로 산출할 수 있었으며 Fig. 9에는 실험값과 식 (5)를 이용하여 계산한 값을 함께 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 실험값과 계산값은 비교적 잘 일치하고 있으며 본 실험범위에서 기류에 의한 열유속은 식 (5)를 이용하여 예측 가능한 것으로 판단된다.

3.4 분무냉각 막 비등 열전달

Fig. 10에는 전체 열유속 q_w 와 과열도 ΔT_{sat} 와 의 관계를 분무중심으로부터의 거리 x 를 파라미터로 하여 나타내었다. 그림에 나타낸 실험결과는 냉각과정에 있어서 0.2초 간격으로 온도를 측정 한 다음 이 값을 열전도 역산법 적용하여 표면 온도 및 열유속을 계산하였으며 그림에는 1.0초 간격으로 계산결과를 나타내었다. 또한 그림에는 $x \geq 30$ mm의 영역에 대한 실험값이 포함되어 있으나 이는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 분무중심을 기준으로 20 mm 정도를 x 방향으로 이동시켜 실험한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 액적유량이 큰 분무중심에서 열유속이 가장 크며 x 가 증가할 수록 액적유량이 감소하기 때문에 열유속도 이와 함께 점차 감소하고 있다. 또한 Fig. 10의 (a)와 (b)의 비교에서 알 수 있듯이 열유속의 x 의존성은 최대 액적유량밀도 D_{max} 가 큰 경우에 있어서 더 크게 나타나고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 D_{max} 가 감소할수록 분무중심과 주변영역의 액적유량밀도의 차이가 점차 작아지고 기류에 의한 열전달의 비율이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 10의 (a)에서 MHF점 온도는 분무중심에서 가장 낮고 $x \leq 20$ mm인 영역에서는 x 가 증대함에 따라 점차 고온으로 되는 경향이 있으며 $x \geq 30$ mm의 영역에서는 위치에 상관없이 거의 일정한 MHF점 온도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 냉각과정에 있어서 MHF점 온도가 고온으로 될 경우 앞서 언급한 바와 같이 강재의 온도가 불균일하게 되어 강재의 변형, 잔류응력의 발생 등으로 인해 생산품의 품질에 악영향을 미치게 될 것으로 판단된다.⁽⁴⁾ 그러나 액적유량이 비교적 적은 (b)의 실험결과에서는 이와 같은 경향이 나타나지 않고 있으며 MHF점 온도는 x 의 영향을 거의 받지 않고 거의 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.



(a) $D_{max}=0.00298 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$



(b) $D_{max}=0.00111 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$

Fig. 10 Local heat flux of spray cooling

Fig. 11에는 국소 열전달률 (local heat transfer coefficient) h_l 와 액적유량밀도 D_x 와의 관계를 나타내었다. 여기서 h_l 는 임의의 위치 x 에서 순수 액적에 의한 열전달률을 나타낸다. 또한 그림에는 액적유량밀도 $D_{max} = 0.002 \sim 0.02 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 범위에서 비교적 농후한 분무영역을 대상으로 실험한 기존의 연구⁽¹⁾에서 얻어진 아래의 식을 이용하여 계산한 결과를 실선으로 나타내었다. 단, 아래의 상관식은 분무중심($x=0$)에서의 열전달률과 액적유량밀도의 관계를 정리한 결과이다.

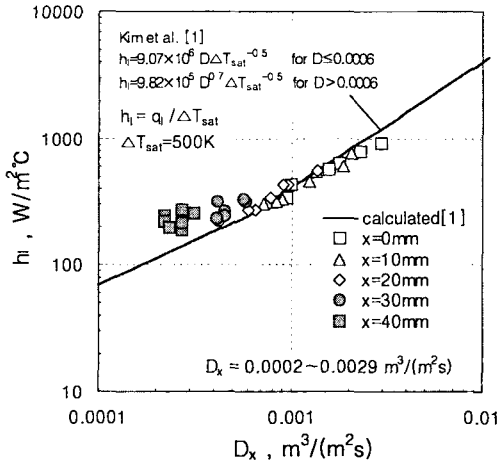


Fig. 11 Correlation of local heat transfer coefficient and local droplet flow rate ($\Delta T_{sat}=500K$)

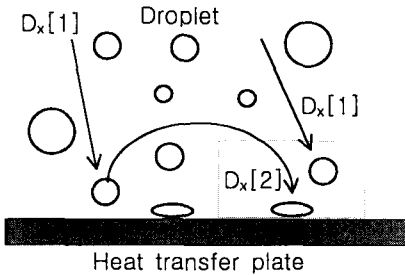


Fig. 12 Rebound motion of droplets

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

$$h_i = 9.82 \times 10^5 D^{0.7} \Delta T_{sat}^{-0.5} \quad \text{for } D > 0.0006 \quad (7)$$

그림에서 알 수 있듯이 $x \leq 10 \text{ mm}$ 인 분무중심영역에서는 기존의 분무중심에서 얻어진 열전달 상관식을 이용한 계산결과와 잘 일치하고 있으나 $x \geq 30 \text{ mm}$ 의 영역에서는 이보다 비교적 높은 값을 나타내고 있다. 이는 분무중심영역에서 멀어질수록 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 리바운드에 의한 액적유량이 증가하여 이로 인해 열전달률이 다소 증가하기 때문인 것으로 판단된다.⁽⁶⁾ 그림에서 $D_x[1]$ 은 분무노즐에서 직접 냉각면 표면에 충돌하는 액적을 의미하며 $D_x[2]$ 는 재충돌에 의한 액적

을 나타낸다. Fig. 11에 나타낸 D_x 에는 앞서 설명한 바와 같이 이러한 리바운드에 의한 재충돌 액적유량이 포함되지 않도록 측정장치를 구성하였기 때문에 $x \geq 30 \text{ mm}$ 의 영역에서 측정된 D_x 는 실제보다 다소 작을 것으로 추정되며 이로 인해 열전달률이 상관식보다 다소 높게 평가된 것으로 판단된다. 따라서 $x \geq 30 \text{ mm}$ 인 주변영역에서 열전달률을 정확히 예측하기 위해서는 회박 분무영역에서 재충돌 액적에 의한 열전달 평가가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 금속 재료의 가공열처리분야에 있어서 금속 재료의 고정밀 냉각제어를 실현하고자 비교적 회박 분무영역을 대상으로 분무냉각 열전달 실험을 수행하여 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 본 실험에서 사용한 2 유체 편평 노즐의 경우 공기압을 증가시킬수록 D_{max} 가 작아지며 분무각이 큰 형태의 분무특성을 가지며 분무중심영역과 주변영역의 액적유량밀도의 차이는 점차 작아져 이로 인해 분무냉각 열유속의 거리 의존성은 점차 작아지고 있음을 알 수 있었다.

(2) 본 실험범위에서 $x \leq 10 \text{ mm}$ 인 분무중심영역에서의 실험값은 비교적 농후한 분무영역을 대상으로 분무중심에서 얻어진 기존의 상관식⁽¹⁾을 이용한 계산결과와 잘 일치하고 있으나 $x \geq 30 \text{ mm}$ 의 주변영역에서는 상관식을 이용한 계산결과보다 비교적 높은 값을 나타내고 있었다.

(3) 주변영역에서는 리바운드에 의한 재충돌 액적유량이 증가할 것으로 추정되며 이 영역에서 열전달률을 명확히 예측하기 위해서는 액적의 크기, 기류의 속도 등의 요인을 고려한 재충돌 액적에 의한 열전달 평가가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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, No. 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," *Trans. of the JSME*, Vol. 62, No. 597, pp. 1991~1997.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (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) Ito, T., Takata, T. and Liu, Z. H., 1989, "On the Water Cooling on Hot Surface," *Trans. of JSME*, Vol. 55, No. 511, pp. 805~813.
- (8) 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.
- (9) Bolle, L. and Moureau, J. C., 1978, *Multiphase Science and Technical*, Vol. 1, Hemisphere Pub. Co.
- (10) 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.
- (11) Beck, J. V., 1970, "Nonlinear Estimation Applied to the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem," *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 703~716.