

고온 강판의 분무냉각에 있어서 MHF 점에 관한 연구

김 영 찬*

Study on Minimum Heat Flux Point in Spray Cooling of Hot Plate

Yeung-Chan Kim

Key Words: Minimum heat flux (최소열유속), Spray cooling (분무냉각), Film Boiling (막비등), Heat transfer (열전달), Heat treatment (열처리), Droplet flow rate (액적유량밀도),

Abstract

In this study, the minimum heat flux conditions are experimentally investigated for the spray cooling of hot plate. The hot plates are cooled down from the initial temperature of about 900°C, and the local heat flux and surface temperatures are calculated from the measured temperature-time history. The results show that the minimum heat flux point temperatures increase linearly resulting from the propagation of wetting front with the increase of the distance from the stagnation point of spray flow. However, in the wall region, the minimum heat flux point temperature becomes independent of the distance. Also, the experimental results show that the velocity of wetting front increases with the increase of the droplet flow rate.

기호설명

- D_x : x 축 방향의 액적유량밀도 [m^3/m^2s]
- D_{max} : 분무중심에서의 액적유량밀도 [m^3/m^2s]
- c_p : 정압비열 [$J/Kg \cdot K$]
- h : 열전달계수 [W/m^2K], $q_w/\Delta T_{sat}$
- k : 열전도계수 [W/mK]
- q_w : 표면열유속 [W/m^2]
- T_d : 액체의 온도 [K]
- T_{MHF} : MHF점 온도 [K]
- T_{sat} : 액체의 포화온도 [K]
- T_w : 전열면의 표면온도 [K]
- U_w : 액막의 전과속도 [mm/s]
- x : 분무중심에서의 거리 [mm]
- ΔT_{MHF} : MHF점 과열온도, $T_{MHF} - T_{sat}$
- ΔT_{sat} : 전열면의 과열온도, $T_w - T_{sat}$

- θ_s : 접촉각
- ρ : 밀도 [Kg/m^3]

1. 서 론

금속재료의 강도를 향상시키기 위한 목적으로 열간 압연된 고온의 금속재료를 특정의 온도영역에서 가속냉각시키는 가공열처리(TMCP)의 적용이 급속히 확산되고 있다. 후판, 박판 등과 같은 강재의 제조과정에서는 생산품의 성질에 영향을 미치지 않는 공정의 생략, 첨가물의 절감 등을 위해 온라인(on-line) 열처리가 주류를 이루고 있으며, 온라인 열처리에는 주로 물을 냉매로 한 분무냉각(spray cooling) 또는 분류냉각(laminar cooling)이 이용되고 있다.

분무냉각은 미립화한 액적을 고온물체의 표면에 충돌시켜 액체의 현열 또는 잠열이동에 의해 고온물체를 냉각시키는 냉각법의 일종이다. 액적의 크기, 유량, 속도 등을 적절히 조절함으로써

* 안동대학교 기계공학부

냉각속도의 제어가 가능하며 또한 냉각성능이 우수하여 강재의 제조, 경수로의 냉각장치, 식품의 급속냉동장치 등에 이미 이용되고 있으며 향후 고밀도 전자기기의 냉각, 고성능 소형 열교환기에의 응용을 목표로 많은 연구가 진행되고 있다.

이중에서도 금속재료의 가공열처리에 있어서 막비등영역의 분무냉각 열전달특성과 MHF점은 매우 중요한 의미를 지니고 있는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 강재의 가공열처리는 강재의 온도가 약 400℃ 이상의 온도영역에서 이루어지며, 이는 비등곡선에서 주로 막비등영역과 MHF점 온도를 포함하는 영역에 해당되기 때문인 것으로 판단된다. 특히 MHF점은 강재의 가공열처리과정에 있어서 급냉이 시작되는 온도와 밀접한 관계가 있으며, MHF점에 대한 제어가 적절히 이루어지지 않을 경우 생산된 강재의 품질에 큰 악영향을 미칠 수 있는 것으로 생각된다. 이와 같이 공업적으로도 매우 중요한 의미를 지니고 있는 MHF점에 대해 현재까지 많은 연구가 이루어져 왔으나, MHF점에 영향을 미치는 요소가 수없이 많고 또한 현상이 매우 복잡하여 아직도 그 실체가 명확히 밝혀지지 않고 있는 상황이다. 실제로 분무류를 이용한 강재의 가공열처리에서는 MHF점 온도가 약 200℃에서 700℃에 이르는 넓은 범위에서 나타나고 있으며 현재까지도 이러한 현상을 명확히 설명할 수 있는 연구결과는 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 주로 고온평판의 분무냉각에 있어서 MHF점에 관한 연구를 실험적으로 수행하였으며 그 결과를 간략히 보고하고자 한다. 특히 본 연구에서는 주로 전열면의 위치, 분무유량과 MHF점과의 관계를 중심으로 실험결과들을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 수평으로 설치된 초기온도 800℃ 정도의 전열면에 분무류를 공급함으로써 전열면을 실온까지 냉각시키는 비정상 실험을 수행하였다. 전열면, 분사노즐과 같은 실험장치는 기존의 연구⁽¹⁾⁽²⁾에서와 거의 동일한 장치를 사용하였으며, 여기에 전열면의 구조, 표면온도 및 열유속의 측정방법, 측정값의 오차추정 등에 대해 자세히 나타내었다. 본고에서는 실험장치 및 방

법에 대해서만 간략히 설명하기로 한다.

전열면은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 가로×세로×두께(x, y, z)가 110×110×20mm의 스테인레스강(SUS304)으로 제작하였으며 적외선 가열장치를 이용하여 일정 온도까지 가열된다. 전열면은 동일한 재질로 제작된 고정틀에 볼트로 고정되어 있으며 냉각면과 고정틀 사이, 냉각면의 후면 등에는 단열성이 우수한 세라믹계 재료를 이용하여 단열 처리하였다. 그림에서도 알 수 있듯이 전열면의 후면에는 폭 1 mm, 깊이 19 mm의 홈(slit)을 가공하여 전열면 내부의 열전도가 일차원적으로 될 수 있도록 배려하였다. 홈은 와이어(wire) 방전가공을 이용하여 제작하였으며 홈 내부에는 세라믹계 단열재를 삽입하였다. 또한 전열면에는 x방향으로 9개의 열전대를 전열면 표면에서부터 약 2 mm의 위치에 설치하여 전열면의 온도이력을 측정하였다. 열전대는 상술한 홈들로 둘러싸인 영역의 중심부(각 블록의 중심부)에 설치하였으며 측정된 각 위치의 온도이력을 일차원 열전도 역산법(inverse method)에 적용하여 전열면 표면에서의 온도, 열유속, 열전달률을 계산하였다⁽³⁾. 사용한 열전대는 K type이며 고온에도 견딜 수 있는 외경 0.9 mm의 sheath형 열전대를 주문 제작하여 사용하였다.

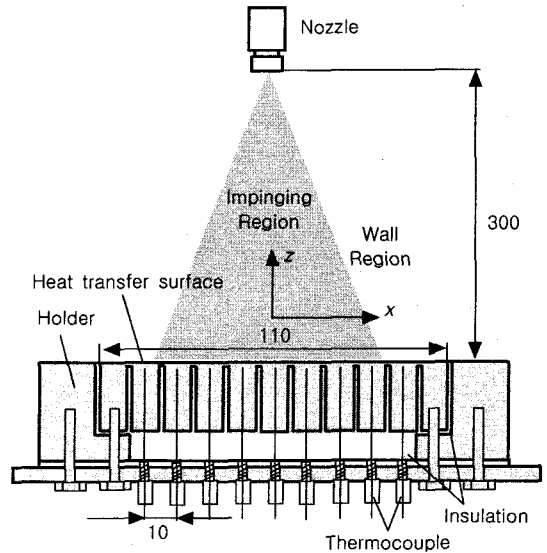


Fig. 1 Schematic of heat transfer plate

또한 지정된 위치에 밀착되어 온도를 측정할 수 있도록 스프링을 장착하였으며 sheath부의 산화방지 및 열전대 측온부와 냉각면사이의 열적 접촉을 보존하기 위해 각각의 열전대 삽입용 구멍에는 고온용 윤활유를 충전하였다. 본 연구에서는 액적유량밀도 D_x, D_y (D_x, D_y : x, y 방향으로의 액적유량밀도) 및 액적의 온도, 크기를 측정하였다. 냉각면에 공급되는 액적의 유량분포는 내경 3.3 mm의 유리관을 이용하여 포집하였으며 이 유리관은 x, y 방향으로 여러 개를 아크릴판에 부착하여 한번에 다수의 측정치를 얻을 수 있도록 제작하였다. 분사노즐을 통과하는 전체유량 Q_d 는 1.68~5.22 l/min이며, 분무중심에서의 D_{max} 는 0.0015~0.015 $m^3/(m^2s)$ 의 범위내에서 실험을 수행하였다. 액적의 평균입경(sauter mean diameter)은 실리콘 오일을 이용하여 액적을 채집한 후 측정된 결과, 150~200 μm 의 값을 나타내었으며, 액적온도 T_d 는 약 25~30°C의 범위에서 실험을 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2에 본 연구에서 사용된 분무노즐에 대한 x 방향의 액적유량밀도 분포 D_x 를 나타내었다. 여기서 액적유량밀도란 냉각면 표면에 공급되는 단위 시간 및 단위 면적당 액적의 부피를 나타내며, 그 단위로서 $m^3/(m^2s)$ 를 사용하였다. 본 연구에서는 x 방향으로만 액적유량밀도의 분포가 존재하는 이차원적인 노즐을 이용하였으며, 이러한 노즐을 사용할 경우 y 방향으로의 액적유량밀도를 거의 동일하게 나타낼 수 있었다. 그림에 나타낸 바와 같이 액적유량밀도 분포는 분무중심($x=0$)에서 멀어질수록 급격히 감소하고 있으며, 노즐을 통과하는 전체유량의 대부분이 $x \leq 30$ mm의 영역에 공급되고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 $x \leq 30$ mm인 영역을 분무중심영역(impinging region), $x \geq 40$ mm인 영역을 주변영역(wall region)으로 구분하였다. 분무중심영역에서는 노즐에서 분사된 액적이 전열면에 직접적으로 충돌하는 액적유량이 대부분을 차지하며, 분무중심영역에서 미증발된 액적은 주변영역으로 유입되어 이 영역에서는 액적의 재충들에 의한 액적유량이 증대될 것으로 추측된다.

Fig. 3에 본 연구에 있어서 대표적인 실험결과

를 나타내었다. 그림에는 분무냉각실험에 있어서 표면열유속 q_w 와 표면온도 ΔT_{sat} 와의 관계를 분무중심으로부터의 거리 x 를 파라미터로 하여 나타내었다. 그림에는 $x \geq 50$ mm의 영역에 대한 실험값이 포함되어 있으나, 이는 Fig. 1에 나타난 전열면을 분무중심을 기준으로 30 mm 정도를 x 방향으로 이동시켜 실험한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 액적유량이 많은 분무중심에서 가장 열유속이 높게 나타나고 있으며 x 가 증대할수록 열유속은 점차 감소하고 있다. 이와 함께 MHF점 온도는 분무중심에서 가장 낮고 $x \leq 40$ mm인 영역에서는 x 가 증대함에 따라 점차 고온화되는 경향이 있으며, $x > 40$ mm의 영역에서는 위치에 상관없이 거의 일정한 MHF점 온도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

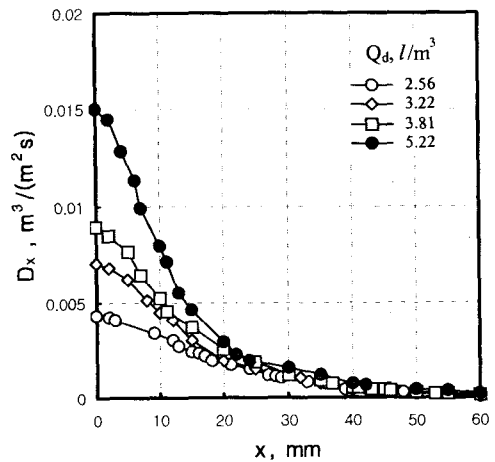


Fig. 2 Distributions of droplet flow rate

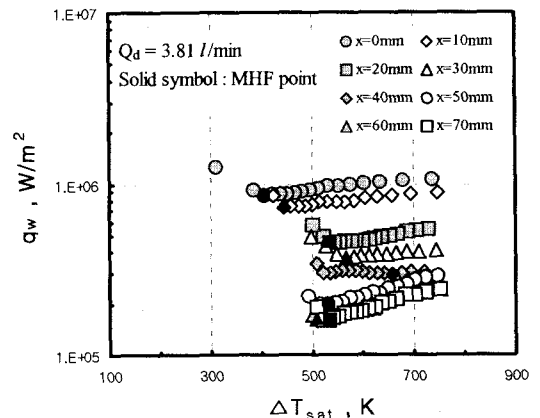


Fig. 3 Heat transfer characteristics of spray cooling

분무중심영역에서 MHF점 온도가 x 의 증대와 함께 점차 고온화되는 현상은 Kokado et al.⁽⁴⁾이 수행한 스테인레스강의 분류냉각 실험결과와도 정성적으로 일치하고 있다. 본 연구에서 있어서 MHF점 온도가 x 의 증대와 함께 고온화되는 현상은 액적과 전열면사이의 증기막이 붕괴됨으로써 형성되는 액막(liquid film)의 전파(propagation)와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 카메라 촬영을 통한 실험과정의 관찰결과를 Fig. 4에 개략적으로 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 분무액적에 의해 냉각이 진행됨에 따라 분무중심에서 최초로 증기막 붕괴로 인한 액적의 부착(wetting)이 발생하였으며 부착영역(wetting region)에서는 매우 얇은 액막이 형성되고 있음을 알 수 있었다. 그리고 부착영역은 냉각이 진행됨에 따라 x 방향으로 비교적 빠른 속도로 확장되어 최종적으로는 전열면 전체영역에서 액막이 형성되고 있음을 관찰결과로부터 알 수 있었다. 실험이 진행되는 동안에 액막이 형성되는 부착영역(wetting region)과 액막이 형성되지 않는 미부착영역(non-wetting region)의 구분이 육안으로도 확인할 수 있을 정도로 선명히 나타나고 있었다. 또한 실험결과로부터 특정영역에서 액적의 부착이 발생하는 시점과 비등곡선에 있어서 MHF점이 시간적으로 거의 일치하고 있음을 알 수 있었으며, 본 연구에서는 이러한 부착영역의 전파가 MHF점 온도의 고온화를 유발시키는 것으로 판단하였다.

Fig. 5에는 분무중심에서의 MHF점 과열온도 ΔT_{MHF} 를 액적유량밀도 D_x 에 대하여 나타내었다. 분무중심에서는 다른 영역보다 냉각속도가 빠르므로 최초로 액막이 형성되며, 따라서 분무중심에서의 MHF점 온도는 위에서 설명한 전파의 영향을 전혀 받지 않는 것으로 판단된다. 이 위치에서는 주로 액적유량, 액적온도, 전열면의 표면조건 등과 같은 요소들에 의해 MHF점 온도가 결정될 것으로 생각된다. 또한 그림에는 Ohkubo and Nishio⁽⁵⁾가 층돌액적을 대상으로 수행한 MHF점 온도에 대한 연구결과를 실선으로 나타내었다. Ohkubo et al.은 분무액적을 대상으로 MHF점에 관한 연구를 수행하여 각기 다른 실험조건하에서도 MHF점 온도를 예측할 수 있는 아래와 같은 관계식을 도출하였다.

$$\Delta T_{MHF} = E(\beta) \cdot (1.63 \times 10^6 \cdot D_{max}^{0.21}) \cdot \theta_s^{-2} \quad (1)$$

$$\Delta T_{MHF} = E(\beta) \cdot (5.16 \times 10^3 \cdot D_{max}^{0.21}) \cdot \theta_s^{-0.6} \quad (2)$$

단, 상기 식들은 $D_{max} > 9 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ 의 조건이며, (1)식은 $\theta_s \leq \theta_c$, (2)식은 $\theta_s > \theta_c$ 의 조건하에서만 사용될 수 있는 것으로 제한하였다. 또한 $\theta_c = 61.9 \times D_{max}$ 이며, $E(\beta)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$E(\beta) = 1 \quad : \beta \leq 0.065 \quad (3)$$

$$E(\beta) = 0.4 \times \ln \beta + 2.1 \quad : \beta > 0.065 \quad (4)$$

$$\beta = [(\rho c_p k)_l / (\rho c_p k)_w]^{0.5} \quad (5)$$

Ohkubo et al.의 연구결과에 의하면 분무냉각에 있어서 MHF점 온도는 액적유량이 증대할수록, 접촉각(contact angle)은 감소할수록 MHF점 온도는 고온화되는 경향이 있는 것으로 보고하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 본 실험결과에 있어서도 분무중심에서의 액적유량이 증가할수록 MHF점 과열온도는 점차 증가하고 있으나 Ohkubo et al.의 연구결과와 비교할 때, 그 경향은 약간 상이한 것으로 나타났다.

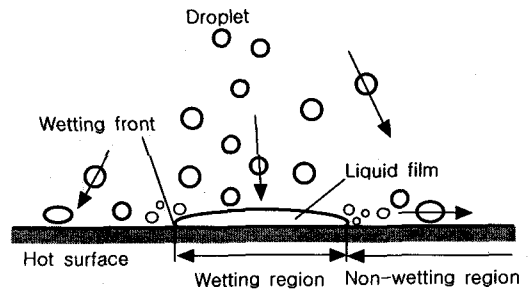


Fig. 4 Propagation behavior of wetting front

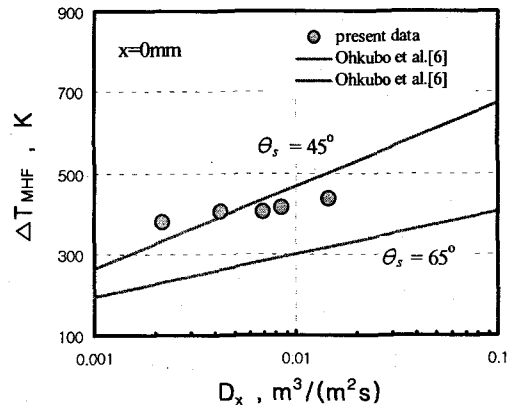


Fig. 5 MHF point temperature of spray cooling

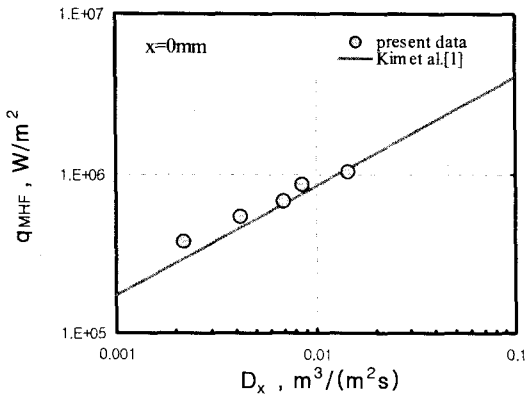


Fig. 6 Minimum heat flux of spray cooling

또한 Ohkubo et al.의 연구결과에서도 나타낸 바와 같이 MHF점 온도를 예측하기 위해서는 전열면 표면의 접촉각에 대한 명확한 평가가 필요하다고 할 수 있다. 그러나 본 실험에서 고온의 스테인레스강은 냉각이 진행됨에 따라 전열면 표면에 산화막이 형성되며 이에 따라 접촉각도 실험이 진행되는 동안 크게 변화할 것으로 판단되기 때문에 특정온도에서의 전열면 표면과 액적과의 접촉각에 대한 명확한 값을 정의할 수 없었다. 다만, 실험전후에 있어서 순수한 물에 대한 스테인레스강(SUS304)의 접촉각을 측정한 결과, 약 40~65° (표면이 산화할수록 접촉각은 작아짐) 정도인 점을 고려하여 이러한 값들을 식(1), (2)에 대입하여 계산한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 실험결과는 산화된 표면의 접촉각을 적용한 계산결과와 비슷한 값을 나타내고 있으나 앞서 언급한 바와 같이 경향은 약간 상이하게 나타나고 있다. 이러한 연구결과와의 차이는 Ohkubo et al.의 연구에서도 지적한 바와 같이 MHF점 온도는 액적유량, 접촉각 이외에도 산화막과 같은 표면의 열저항층의 형성이 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단되며, MHF점 온도의 정확한 예측을 위해서는 이러한 요소들의 평가가 추가적으로 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 6에는 분무중심에서의 액적유량 D_x 와 최소 열유속 q_{MHF} 와의 관계를 나타내었다. 그림에는 Kim et al.⁽¹⁾의 분무냉각 막비등열전달에 관한 관계식을 이용한 계산결과를 함께 나타내었다. 그림에서부터 열유속은 액적유량밀도가 증가할수록

직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. Kim et al.의 분무냉각 막비등열전달에 관한 관계식에서 막비등 열전달은 $h \propto D_x^m \cdot \Delta T_{sat}^m$ 의 형태로 나타나고 있으며, 그림에서는 ΔT_{sat} 에 해당되는 값에 ΔT_{MHF} 을 대입하여 계산한 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 실험값과 관계식을 이용하여 계산한 값은 비교적 잘 일치하고 있으며, 이는 MHF점 과열온도를 알 수 있을 경우 이 점에서의 최소열유속은 막비등열전달에 관한 관계식을 이용하여 예측이 가능함을 의미하는 것으로 판단된다. Fig. 7에는 분무유량 Q_d 를 변화시켜 각각의 조건에 대하여 MHF점 과열온도와 분무중심에서부터의 거리 x 와의 관계를 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 $x \leq 30$ mm인 분무중심영역에서는 x 가 증가할수록 MHF점 과열온도도 거의 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 $x \geq 40$ mm인 주변영역에서는 이러한 경향은 나타나지 않고 있으며 MHF점 과열온도는 분무유량에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 분무중심영역에서는 액적의 충돌속도가 비교적 빠르며 또한 액적유량이 많아 일단 액적이 전열면에 부착되어 액막이 형성되면 액막이 주위로 빠른 속도로 확장되기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 특정영역에서 액적이 전열면에 부착되는 시점(증기막이 붕괴는 시점)을 비등곡선에서 MHF점의 발생과 동일시하였으며, 본 연구범위에서 분무중심영역의 MHF점 과열온도와 전열면 위치 x 와의 관계는 다음과 같은 간단한 식으로 나타낼 수 있었다.

$$\Delta T_{MHF} = \Delta T_{MC} + 5.9 \cdot x \quad (6)$$

단, ΔT_{MC} 는 분무중심에서의 MHF점 과열온도이다. 그러나 액적유량이 매우 적고 액적의 충돌속도가 비교적 느리다고 판단되는 주변영역에서는 전파에 의한 MHF점의 고온화현상이 나타나지 않고 있으며, 그 값도 위치에 상관없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 이 영역에서의 MHF점 온도는 전파에 의한 영향을 매우 적게 받으며, 주로 액적유량, 표면상태 등과 같은 요소들에 의해 결정되는 것으로 판단된다. 그러나 주변영역에서의 액적유량은 분무중심에서의 액적유량보다 훨씬 적음에도 불구하고 MHF점 온도는 분무중심에서의 MHF점 온도보다 여전히 높게 나타나고 있으며, 이러한 점에 대해서는 여전히 불명확한 상태로 남아 있다.

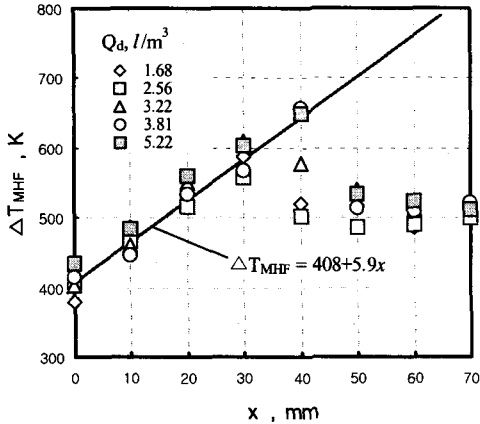


Fig. 7 MHF point temperature of spray cooling

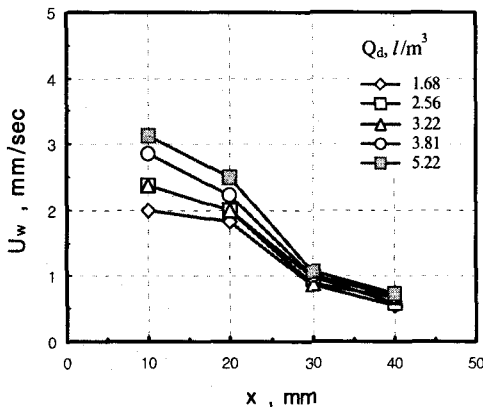


Fig. 8 Propagation velocity of wetting front

Fig. 8에는 액막의 전파속도를 측정하여 전열면의 위치에 대하여 나타내었으며 그림에 나타난 액막의 전파속도는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$U_w = x / \Delta t \quad (7)$$

여기서 $\Delta t = t_x - t_{x=0}$ 이며, t_x 는 x 위치에서 액적의 부착이 발생하는 시점(또는 MHF점에 도달하는 시점), $t_{x=0}$ 는 분무중심에서 액적의 부착이 발생하는 시점(또는 MHF점에 도달하는 시점)을 각각 나타낸다. 그림에서 액막의 전파속도는 분무유량에 큰 영향을 받아 노즐을 통과하는 분무유량 Q_d 가 클수록 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 전열면 위치에 있어서도 액적유량 D_x 가 큰 분무중심영역에서 전파속도가 가장 크며 분무중심영역에서 멀어질수록 전파속도는 느려지

고 있음을 알 수 있다. 이러한 각 위치에서의 전파속도의 차이는 MHF점 온도에 큰 영향을 미치는 것으로 생각되며, Fig. 8에 나타난 바와 같이 MHF점 온도를 고온화시키는 요인으로 작용할 것으로 판단된다. 액막의 전파속도는 그 영역에서의 액적유량 이외에도 액적의 온도, 전열면의 표면성질 등과 같은 수 많은 요소들의 영향을 받을 것으로 판단되지만, 본 연구에서는 아직 이와 같은 요소들과 전파속도에 대한 정량적 평가에는 이르지 못하였으며 이러한 부분에 대해서는 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

재료의 가공열처리를 염두에 둔 분무냉각 열전달실험을 수행하여 MHF점에 대하여 고찰한 결과, 냉각속도가 비교적 빠른 분무중심에서 최초로 액적의 부착으로 인한 액막이 형성되며, 이 액막은 x 방향으로 전파되어 분무중심에서 멀어질수록 MHF점 온도는 고온화되는 경향이 있는 것으로 밝혀졌다. 또한 액막의 전파속도는 그 위치에서의 액적유량에 큰 영향을 받아 액적유량이 증가할수록 전파속도도 증가함을 알 수 있었다. 그러나 액적유량이 적고 액적의 충돌속도가 느린 주변영역에서는 이러한 전파의 영향을 거의 받지 않고 있으며 MHF점 온도도 위치와 액적유량에 관계없이 거의 일정값을 나타내고 있었다.

참고문헌

- (1) Kim, Y.C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1994, Spray Cooling with Formation of Liquid Film (Distribution of Heat Transfer Coefficient in High Temperature Region), Trans. JSME(B), Vol. 60-574, pp. 2158-2164.
- (2) 김영찬·유갑중·서태원, 2000, 분무냉각에 의한 강판 열처리과정에 있어서 열전달분포의 측정, 설비공학논문집, vol. 12-10, pp. 886-893.
- (3) 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.
- (4) Kokado, J. et al., 1984, An Analysis of Film Boiling Phenomena on Subcooled Water Spreading Radially on Hot Plate, Arch. Eisenhüttenwes., Vol. 55-3, pp. 113-118.
- (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.