

분무냉각에 의한 강판 열처리과정에 있어서 열전달분포의 측정

김 영 찬[†], 유 갑 중^{*}, 서 태 원
안동대학교 기계공학부, ^{*}경북대학교 기계공학부

Measurements of Heat Transfer Distribution in Spray Cooling of Hot Steel Plate

Yeung-Chan Kim[†], Kap-Jong Riu^{*}, Tae-Won Seo

School of Mechanical Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea
^{*}School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

(Received December 15, 1999; revision received July 18, 2000)

ABSTRACT: A good understanding of the heat transfer distribution is very important to suppress the deformation of steel products. In this study, the local heat transfer coefficients are experimentally investigated to understand the heat transfer distribution of thick steel plates with even flat spray nozzle. The steel slabs are cooled down from the initial temperature of about 1000°C, and the local heat transfer coefficients and surface temperatures are calculated from the measured temperature-time history. The results show that the local heat transfer coefficients of spray cooling are dominated by the local droplet flow rate, and in proportion to becoming more distant from the center of heat transfer surface, the local heat transfer coefficients decrease with the decrease of the local droplet flow rate.

Key words: Spray cooling(분무냉각), Boiling(비등), Heat treatment(열처리), Droplet flow rate (액적유량), Heat transfer(열전달)

1. 서 론

분무냉각은 미립화한 액적을 고온물체의 표면에 충돌시켜 액체의 현열 또는 잠열이동에 의해 고온물체를 냉각시키는 냉각법의 일종이다. 액적의 크기, 유량, 속도 등을 적절히 조절함으로써 냉각속도의 제어가 가능하며 또한 냉각성능이 우수하여 강재의 제조, 경수로의 냉각장치, 식품의 급속냉동장치 등에 이미 이용되고 있으며 향후 고밀도 전자기기의 냉각, 고성능 소형 열교환기

에의 응용을 목표로 많은 연구가 진행되고 있다.

특히 분무냉각은 강재의 냉각에 가장 활발히 이용되고 있다. 종래의 강재의 제조과정은 단순한 「가열-냉각」의 반복이었다고 말할 수 있다. 즉 강재는 열처리목적 이외에도 단순히 공정관리상 자연 냉각되어 일정기간 보관되며 필요시 재가열 후 강제냉각과정을 거치는 경우가 대부분이었다. 최근, 제조공정을 단순화하고 에너지를 절약하기 위해서 강재의 성질에 영향을 미치지 않는 「가열-냉각」 과정은 점차 배제되고 있으며, 주조, 열간압연 및 제어냉각과정을 연속적으로 실행하는 강제 제조법, 즉 TMCP(Thermo-Mechanical Control Process)가 급속히 확산되고 있다. TMCP에서는 강재의 성질을 제어하기 위해 가속

[†] Corresponding author

Tel.: +82-54-850-6013; fax: +82-54-841-1630

E-mail address: yeung@andong.ac.kr

냉각을 소정의 온도에서 정지할 필요가 있으나, 이때에 냉각영역(cooling zone)의 출구에 있어서 강재의 온도가 불균일하게 되는 냉각불안정현상이 큰 문제점으로 지적되고 있다. 특히 이러한 냉각불안정현상은 강재의 두께가 비교적 두꺼운 후판 냉각에 있어서 심각하게 발생하고 있으며 이는 주로 강재표면에 공급되는 액적유량의 불균일, 강재표면에서의 액막형성 등으로 인한 표면에서의 열전달률의 불균일에 기인한다고 할 수 있다. 그 결과, 생산된 강재는 내부성질의 불균일, 잔류응력의 발생 등으로 인해 품질이 크게 저하되는 경향을 보이고 있는 실정이다.

분무냉각에 관한 연구는 주로 강재의 제조과정과 관련하여 많은 연구가 이루어져 왔다.⁽¹⁻¹⁰⁾ 분무냉각 열전달에 영향을 미치는 인자로서는 냉각액체에 관한 인자와 피냉각체에 관한 인자로 구분할 수 있다. 냉각액체에 관한 인자로서는 액적유량, 온도, 속도, 직경 등을 들 수 있으며 피냉각체에 관한 인자로서는 표면상태, 표면온도, 크기 등을 들 수 있다. 이 중에서도 액적유량은 분무냉각 열전달에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서 알려져 있다.⁽¹⁻⁷⁾ 그러나 각 연구자마다 그 연구결과가 상이하여 현장에서 일반적으로 적용할 수 있는 경험식도출 등은 아직 미흡한 상태로 남아 있으며 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 냉각면표면에 공급되는 액적유량밀도의 불균일로 인해 발생하는 표면열전달의 불균일현상, 즉 냉각불안정현상을 이해하기 위한 기초적 연구로서 비교적 큰 냉각면⁽¹⁾을 이용하여 냉각면표면 각 위치에서의 국소열전달률을 측정하였다. 그리고 측정된 국소열전달률과 액적유량밀도와의 관계를 규명하였다. 특히 본 연구에서는 액적유량밀도의 범위를 확장하여 $D_x=0.002\sim 0.025\text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 비교적 넓은 범위의 액적유량에 대한 국소열전달률을 측정하여 그 결과를 나타내었다. 또한 실험방법에 대하여 주로 냉각면의 구조, 온도측정 및 열유속의 계산법, 측정값의 추정오차 계산결과 등을 추가적으로 기술하였으며, 측정결과를 종래의 연구결과와 비교하여 본 측정법에 대한 신뢰성에 대해서도 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

상술한 바와 같이 냉각불안정현상을 유발시키는 원인으로서의 우선 냉각표면의 각 위치에 공급되는 액적유량밀도의 불균일을 들 수 있다. 여기서 액적유량밀도란 냉각면표면에 공급되는 단위시간 및 단위면적당 액적의 부피를 나타내며, 액적유량밀도의 단위로서 $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 를 사용하였다. 강재의 냉각시 분무노즐은 냉각대상물의 냉각특성을 고려하여 적절한 형태의 것을 채용하고 있으며, 분무액체의 분사형태와 액체의 미립화방법 등에 따라 여러 가지 형태의 노즐이 사용되고 있다. 예를 들면 원추형(full cone) 분무노즐의 경우, 일반적으로 분무중심에서 가장 큰 액적유량밀도를 나타내며 분무중심에서 멀어질수록 점차 감소하는 분무형태를 나타내고 있다. 이러한 분무형태의 노즐을 사용할 경우 냉각표면 각 위치에서의 냉각속도가 불균일하게 되어 결국 제품의 품질저하를 유발하게 된다. 이러한 측면에 있어서 분무노즐은 가능한 액적유량밀도의 분포가 적은 형태의 것을 사용하거나 또는 복수개의 분무노즐을 유효 적절히 배치하여 가능한 액적유량밀도의 분포를 최소화하는 배려가 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 비교적 액적유량밀도의 분포가 큰 형태의 이차원적인 원추형 분무노즐을 사용하여 실험을 수행하였다.

2.1 액적유량밀도의 측정

본 연구에서는 액적유량밀도 $D_x, D_y(D_x, D_y: x, y$ 방향으로의 액적유량밀도) 및 액적의 온도, 크기를 측정하였다. Fig. 1에 액적유량밀도의 측정장치를 나타내었다. 냉각면에 공급되는 액적의 유량분포는 내경 3.3mm의 유리관을 이용하여 포집하였으며 이 유리관은 x, y 방향으로 여러 개를 아크릴판에 부착하여 한번에 다수의 측정치를 얻을 수 있도록 제작하였다. 아크릴판은 3차원 이동장치에 연결되어 지정된 위치에서 액적유량밀도가 측정될 수 있도록 하였다. 또한 액적포집용 유리관을 아크릴판의 평면 위치보다 10mm 높게 설정하여 액적이 아크릴판에 일차 충돌한 후 튀어 올라 유리관에 포집되는 현상으로 인해 발생될 수 있는 측정오차를 최소화하였다.

일정시간동안 포집된 액적은 매스실린더를 이

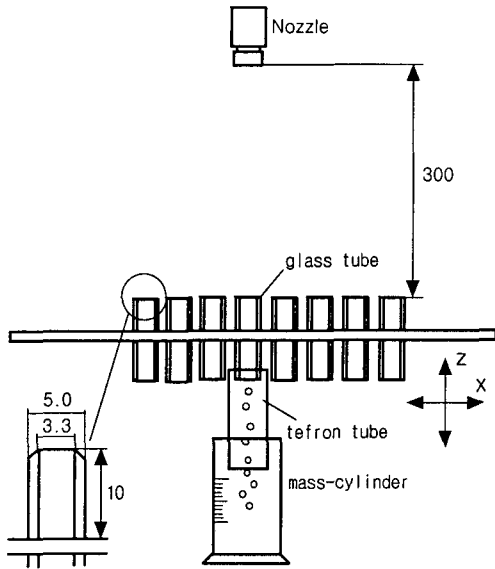


Fig. 1 Measurement of droplet flow rate.

용하여 계량하였으며 다음 식을 이용하여 액적유량밀도를 산출하였다.

$$D = \frac{V}{a \cdot t} \quad (1)$$

여기서 V 는 포집된 액적의 부피이며, a 는 유리관의 단면적, t 는 포집시간이다. 노즐을 통과하는 전체유량 Q_d 는 액체를 펌프를 이용하여 가압함으로써 조절할 수 있도록 하였다. 본 연구가 대상으로 한 Q_d 의 범위는 2.35~9.25 l/min이며, 분무중심에서의 D_x 값은 0.007~0.025 $m^3/(m^2s)$ 의 범위 내에서 실험을 수행하였다. 액적의 평균입경 (sauter mean diameter)은 실리콘 오일을 이용하여 액적을 채집한 후 측정된 결과, 150~200 μm 의 값을 나타내었으며, 액적온도는 약 25 $^{\circ}C$ 로 균일하게 설정하여 실험을 행하였다.

2.2 냉각면의 구조

본 연구에서는 냉각면을 약 1000 $^{\circ}C$ 까지 가열한 후 분무액적을 이용하여 실온까지 냉각시키는 비정상실험을 행하였다. 냉각면은 각 위치에 있어서의 국소열전달률을 측정하기 위해 비교적 크게 제작하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 크기는 가

로, 세로, 두께가 각각 110 \times 110 \times 20 mm이며 스테인레스강(SUS304)으로 제작하였다. 냉각면은 Fig. 3에서도 나타낸 바와 같이 동일한 재질로 제작된 고정틀에 볼트로 고정되어 있으며 냉각면과 고정틀 사이, 냉각면의 후면 등에는 단열성이 우수한 세라믹계 재료등으로 단열처리하였다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 냉각면 표면에서 약 2mm의 위치에 설치한 열전대로부터 측정된 각 위치의 온도 이력을 일차원 열전도 역산법(inverse method)에 적용하여 냉각면 표면에서의 온도, 열유속, 열전달률을 각각 계산하였다. 따라서 그림과 같이 x, y, z 좌표를 설정할 경우, 냉각면 내에서의 열전

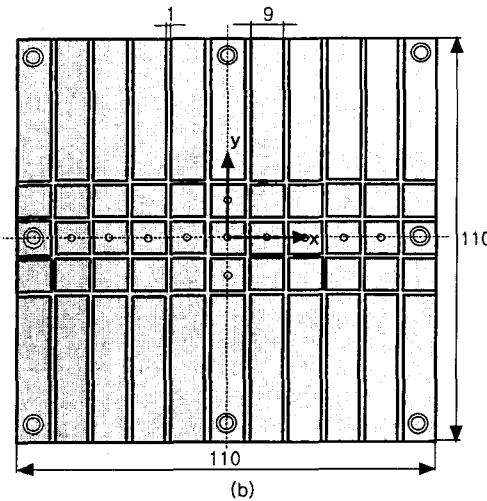
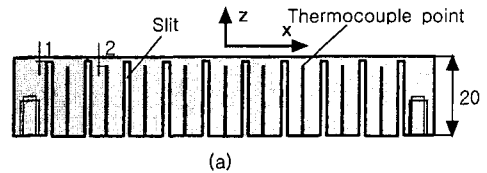


Fig. 2 Schematic of heat transfer plate.

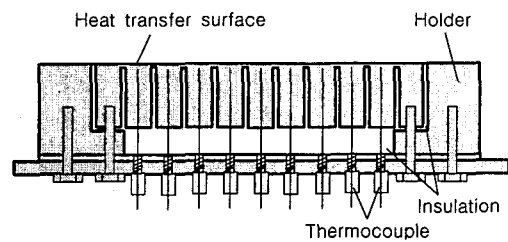


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus.

달을 가능한 z 방향으로만 보존할 필요가 있다. 본 연구에서는 냉각면 내에서의 y, z 방향으로의 열전달을 방지하기 위해 냉각면 후면으로부터 폭 1 mm, 깊이 19 mm의 홈(slit)을 x, y 방향으로 가공하였으며, 이 홈으로 둘러싸인 영역(가로×세로 : 9 mm×9 mm)의 중심부에 열전대를 설치하였다. 홈은 와이어(wire) 방전가공을 이용하여 제작하였으며 홈 내부에는 세라믹계 단열재를 삽입하였다.

2.3 냉각면 온도이력의 측정

본 연구에서는 액적유량밀도 분포가 현저히 존재하는 x 방향의 열전달분포를 측정하기 위해 냉각면 후면으로부터 깊이 약 18 mm의 구멍(냉각면 표면에서부터는 약 2 mm)을 뚫어 열전대를 설치하였다. 열전대는 상술한 홈으로 둘러싸인 영역의 중심부(각 블록의 중심부)에 설치하였으며 측정된 각 위치의 온도이력을 다음절에 간략히 설명할 일차원 열전도 역산법에 적용하여 냉각면 표면에서의 온도, 열유속, 열전달률을 계산하였다. 본 연구에서는 이와 같이 계산된 열전달률을 이 영역에서의 국소열전달률 h_x 로 나타내었다.

Fig. 4에 본 연구에서 사용한 열전대의 개략도를 나타내었다. 사용한 열전대는 K type이며 고온에도 견딜 수 있는 외경 0.9 mm의 sheath형 열전대를 주문 제작하여 사용하였다. 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.

2.4 열손실 측정

상술한 바와 같이 냉각면의 측면, 후면, 또는 홈 속에는 세라믹계 단열재를 삽입하여 단열처리

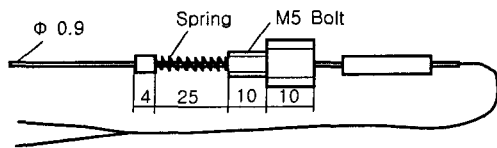


Fig. 4 Schematic of thermocouple (K type).

하여 냉각면 표면이외에서 발생하는 열손실은 매우 작을 것으로 판단하였다. 그러나 냉각면은 약 1000°C 이상으로 가열된 후 분무액적을 이용하여 비교적 급속히 냉각되기 때문에 약간의 열손실이 발생할 것으로 생각된다. 이러한 냉각면의 측면 또는 후면으로부터의 열손실을 측정하기 위해 두께 40 mm 정도의 세라믹계 단열재를 이용하여 냉각면표면을 완전히 단열한 후 자연냉각시켜 표면열유속을 구하였다. 본 연구에서의 실험결과들은 모두 이 열손실을 고려한 측정값임을 밝혀둔다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 액적유량밀도의 측정결과

Fig. 5에 본 연구에서 사용된 분무노즐에 대한 x 방향의 액적유량밀도 분포를 나타내었다. 상술한 바와 같이 본 연구에서는 이차원 원추형노즐을 사용하였으며, 이 노즐을 사용할 경우 y 방향으로의 액적유량밀도를 거의 동일하게 나타낼 수 있다. 즉 그림에는 나타나지 않았으나 y 방향으로의 액적유량 밀도분포는 본 연구의 측정범위 내에서는 거의 나타나지 않았으며 그 값은 분무중심($x=0$)에서의 D_x 와 동일함을 알 수 있었다. 즉 본 연구에서는 한 방향으로만 액적유량밀도의 분포가 존재하는 이차원적인 노즐을 이용하여 액적유량 밀도분포가 현저히 존재하는 x 방향을 중심으로 열전달분포의 측정 및 검토를 행하였다.

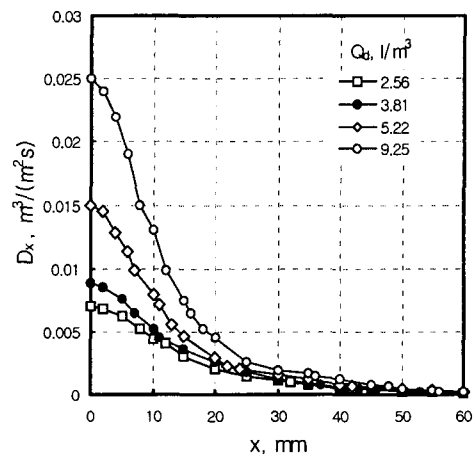


Fig. 5 Distributions of droplet flow rate.

3.2 측정값의 오차추정

상술한 바와 같이 본 연구에서는 측정된 냉각각면 내부의 온도이력에 기초하여 Beck⁽¹¹⁾가 제안한 열전도 역산법(inverse method)과 동일한 방법을 이용하여 냉각면 각 위치에서의 표면온도 및 열유속을 계산하였다. 냉각면은 x, y 방향의 열전달을 방지하기 위해 폭 1mm의 홈을 가공하였으나 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 두께 δ=1mm의 스테인레스강에 의해 연결되어 있는 상태이다. 이 영역에 있어서는 각 블록 상호간 x, y 방향으로 열전달이 가능하며 이로 인해 측정오차가 발생할 수도 있다. 이러한 영향을 검토하기 위해서 아래와 같은 예비적 계산을 행하였다.

(1) 분무중심에 위치한 블록(n=1, n: 분무중심에서 x 방향으로의 블록의 배열순번) 표면에서의 열유속($q_w[n=1]$)을 가정하여 표면과열도 ΔT_{sat} 의 함수로서 Fig. 7의 실선(q_w)으로 나타내었다. 여기서 표면과열도 $\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat}$ (T_w : 표면온도, T_{sat} : 냉각액체의 포화온도)이다.

(2) n 번째 블록에 있어서 열유속, $q_w[n]$ 을 아래와 같이 가정한다. 즉 분무중심에 위치한 블록 표면에서의 열유속이 가장 크며 분무중심에서 멀어질수록 일정한 비율로 적어진다고 가정한다. 이는 본 연구에서 사용한 분무노즐의 분무형태가 분무중심영역에서 가장 액적유량밀도가 크며 주변영역에서는 점차 적어지는 경향을 보이고 있으며, 표면열유속 역시 이와 유사한 경향을 보일

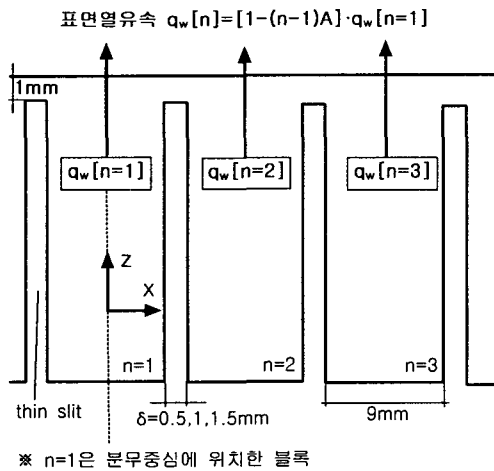


Fig. 6 Physical model for error estimation.

것으로 판단하였기 때문이다. 후술하는 본 실험 결과에 기초할 때 이러한 가정은 타당한 것으로 생각되며, 분무중심에서부터의 거리에 따라 열유속이 감소하는 비율을 상수 A를 이용하여 나타내었다. 즉 n 번째 위치한 블록 표면에서의 열유속을 아래와 같은 식으로 나타내었다. 아래 식에서 A는 1보다 적으며 주로 분무형태에 의존하는 상수이다.

$$q_w[n] = [1 - (n-1)A] \cdot q_w[n=1] \quad (2)$$

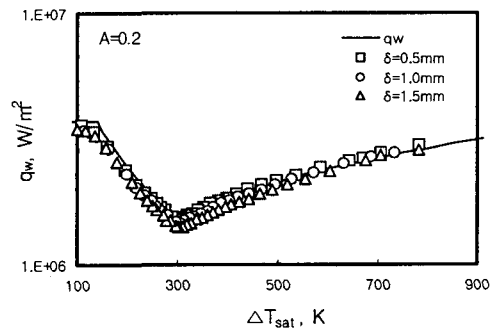


Fig. 7 Error estimation of measured data (I).

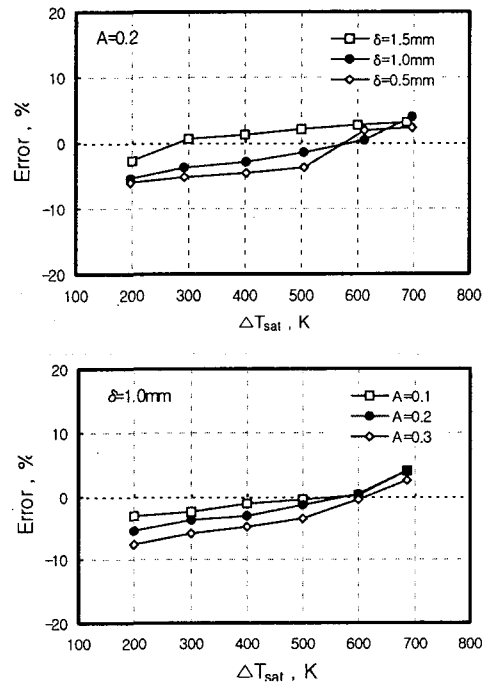


Fig. 8 Error estimation of measured data (II).

(3) 다음에 x 방향의 각 블록에 대해 상술한 조건들을 적용하여 이차원 비정상 열전도계산을 수행하여 각 블록내부의 온도이력을 구하였다.

(4) 이 온도이력을 상술한 열전도 역산법에 적용하여 각 블록표면에서의 열유속 및 온도분포를 구하여 최초 가정된 열유속과 비교하였다

Fig. 7, 8에 분무중심에 위치한 블록을 대상으로 한 계산결과를 나타내었다. 우선 Fig. 7에는 상수 $A=0.2$ 로 가정한 후 Fig. 6에 나타난 홈의 폭 (δ)을 변화시켜 계산한 결과를 나타내었다. 또한 Fig. 8의 아래그림에는 홈의 폭 $\delta=1\text{ mm}$ 로 고정한 후 상수 A 를 변화시켜 계산한 결과를 나타내었다. 열전도 역산법을 이용한 열유속 계산시 온도이력의 샘플링시간을 0.1초 단위로 실시하였다. Fig. 7, 8에서 알 수 있듯이 $\delta=0.5\text{ mm}$ 인 경우는 거의 전 영역에서 -오차를 나타내고 있으며 $\delta=1.5\text{ mm}$ 인 경우에 있어서는 표면과열도 ΔT_{sat} 가 약 300 K를 넘어설 경우 +오차를 나타내고 있다. 이는 δ 가 작을 경우 분무중심에 위치한 블록의 냉각속도보다 이웃하고 있는 블록의 냉각속도가 느린 관계로 두 블록간에 온도차가 발생하게 되며 얇은 스테인레스층을 통하여 이웃의 블록으로부터 분무중심에 위치한 블록으로의 열전달이 이루어지게 된다. 따라서 분무중심에 위치한 블록표면의 열유속은 최초 가정된 열유속보다 작아지게 되는 결과를 나타내고 있다. 이와는 반대로 $\delta=1.5\text{ mm}$ 인 경우에 있어서는 블록을 연결하고 있는 두께 1mm의 스테인레스층이 급격히 냉각되어 이웃하고 있는 각 블록의 온도분포에 영향을 미치게 되며 결과적으로 블록내부의 열유속이 얇은 스테인레스층을 통해 과다하게 유출되어 최초 가정된 열유속보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 검토한 모든 경우에 있어서 그 오차는 약 $\pm 5\%$ 이내이며 실제의 냉각면에는 오차범위가 가장 작다고 판단되는 $\delta=1.0\text{ mm}$ 를 적용하여 제작하였다. 상수 A 의 변화에 대한 계산결과는 그림에서 알 수 있듯이 A 가 작을수록 그 오차는 작아지는 것으로 나타났다. 상수 A 는 상술한 바와 같이 블록간의 냉각속도의 차이를 나타내는 값으로서 A 가 작을수록 블록간 냉각속도의 차이는 작아지게 된다. 본 연구에서 사용된 분무노즐의 분무형태와 기존의 연구결과를 참고로 할 때 A 는 0.2 정도의 값이 적정하다고 판단하였다.

3.3 고온영역에서의 열전달분포

실험결과의 대표적인 예로서 국소열전달률 h_x 와 분무중심에서의 거리 x 와의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에 나타난 열전달률은 표면과열도가 700 K로서 막비등영역에 해당되는 측정값이다. 이 측정결과는 상술한 바와 같이 열손실 실험으로부터 측정된 손실 열유속을 고려한 측정값이며 Fig. 10에 손실 열유속의 측정결과를 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 액적유량밀도가 가장 높은 분무중심에 위치한 블록표면의 냉각속도가 가장 빠르며 이 영역에서 멀어질수록 냉각속도가 점차 늦어지고 있다. 또한 이 온도이력에 기초하여 열전도 역산법을 이용하여 계산한 열전달률도 이와 동일한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 분무중심영역에 위치한 블록표면에서

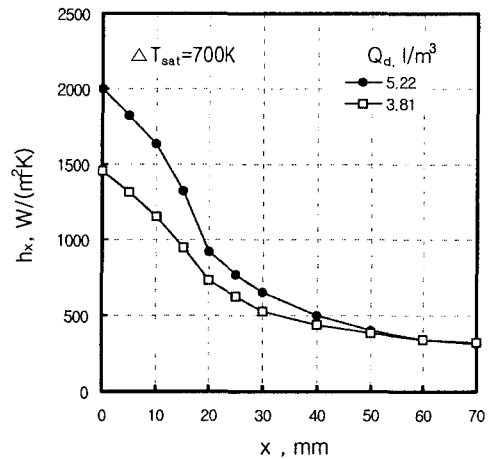


Fig. 9 Heat transfer distribution.

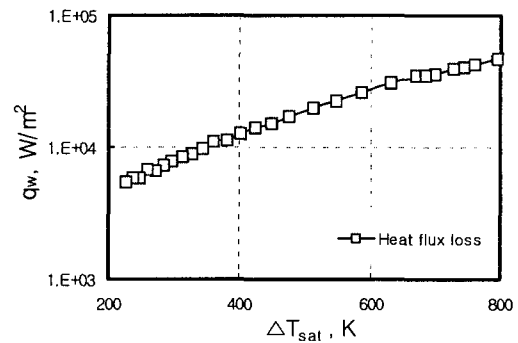


Fig. 10 Heat loss of heat transfer plate.

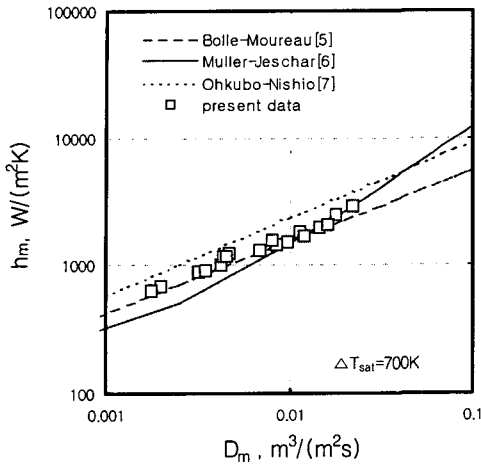


Fig. 11 Plot of experimental data.

의 열전달률이 이 영역으로부터 약 70 mm 정도 떨어진 주변영역에서의 열전달률의 3~4배에 달하고 있다. 이러한 사실은 피냉각물체의 열전달률은 냉각물체표면에 공급되는 국소의 액적유량에 큰 영향을 받고 있음을 확인시켜 주는 연구결과이다.

3.4 액적유량밀도와 열전달률과의 관계

Fig. 11은 평균열전달률 h_m 과 평균액적유량밀도 D_m 과의 관계를 나타내었다. 여기서 평균열전달률과 평균액적유량밀도는 분무중심($x=0$)에서 일정거리 x 까지의 영역내의 열전달률과 액적유량밀도를 평균한 값을 나타내고 있다. 또한 그림중에는 기존의 분무냉각에 관한 대표적인 연구결과들을 병기하여 나타내었다. 그림에서 본 연구결과는 기존의 연구결과와 비교할 때 유사한 경향을 나타내고 있으며 또한 평균열전달률은 평균액적유량밀도의 함수로서 잘 표현될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 강판과 같은 고온의 물체냉각시 액적유량밀도의 분포로 인해 발생할 수 있는 냉각불안정현상을 이해하고 그 대응책을 마련하기 위한 기초적 연구로서, 우선 분무냉각을 이용한 강판냉각에 있어서의 국소열전달률의 분포를 측

정하고 액적유량밀도와와의 관계를 명확히 하였다. 또한 이와 관련된 냉각면의 구조, 표면온도 및 열유속의 산출방법 등에 대하여 간략히 소개하였다. 연구결과, 분무냉각에 있어서 국소열전달률은 액적유량밀도에 의해 지배되고 있으며, 국소열전달률은 액적유량밀도가 큰 분무중심에서 가장 크게 나타나며 분무중심에서 멀어질수록 액적유량밀도의 감소와 함께 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 그 관계는 상호 잘 정리될 수 있었으며, 또한 기존의 분무냉각에 관한 연구결과들과의 비교에 있어서도 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이러한 사실들로부터 본 연구에서 채택한 냉각면 및 온도측정기술은 비교적 규모가 큰 냉각면의 국소열전달률의 분포측정에 있어서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Kim, Y. C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1995, 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. 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. JSME(B), 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, Trans. JSME(B), 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 and Mass Transfer, Vol. 41, pp. 4113-4119.
5. Bolle, L. and Moureau, J. C., 1978, Spray Cooling of Hot Surface, Multiple Science and Technology, pp. 76-90.
6. Muller, H. and Jescher, R., 1973, Investigation of the Heat Transfer in a Simulate Secondary Cooling Zone in the Continuous

- Casting Process, Arch Eisenhüttenwes, Vol. 24-1, pp. 589-594.
7. Ohkubo, H. and Nishio, S., 1988, Mist Cooling for Thermal Tempering of Glass, JSME International Journal, Vol. 31, pp. 444-449.
 8. Ohkubo, H. and Nishio, S., 1993, Study on Mist Cooling on Heat Treatment of Metal, Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, Vol. 2-8, pp.3-17.
 9. Shoji, S., Wakunaga, K. and Kodama, K., 1984, Heat Transfer between Hot Surface and Impinging Subcooled Droplet, Trans. JSME, B50, pp. 716-723.
 10. Bernardi, J. D. and Mudawar, I., 1997, Film Boiling Heat Transfer of Droplet Streams and Sprays, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 40, pp. 2579-2593.
 11. 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.