

## 고온평판의 분무냉각특성에 관한 연구

윤 두 호\* · 윤 석 훈\*\*

### A Study on the Spray Cooling Characteristics of Hot Flat Plates

D. H. Yoon\* · S. H. Yoon\*\*

**Key words** : Spray Cooling(분무냉각), Heat Transfer Characteristics(열전달특성), Cooling Curve(냉각곡선), Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Surface Heat Flux(표면열유속), Boiling Phenomenon(비등현상), Minimum Heat Flux(극소열유속), Flat Spray Nozzle(부채꼴분사노즐), Critical Heat Flux(임계열유속)

#### Abstract

In order to study heat transfer characteristics of spray cooling for the purpose of uniform and soft cooling of high temperature surface, a series of experiments for a hot, horizontal copper flat plate was performed by downflow spray water using flat spray nozzle. Cooling curves were measured under the various experimental conditions of flow rates and temperatures of cooling water

Surface temperature, surface heat fluxes and heat transfer coefficients of horizontal upward-facing flat surface were calculated with cooling curves measured at each radial positions near the cooling surface by TDMA method. Generally, heat transfer characteristics for spray cooling is similar to boiling phenomenon of pool boiling.

The minimum heat flux(MHF) appear at the surface temperature of about  $\Delta T_{\text{sat}}=250^\circ\text{C}$ , and the critical heat flux(CHF) appear at about  $\Delta T_{\text{sat}}=200^\circ\text{C}$ .

#### 1. 서 론

미립화된 많은 양의 작은 액적들을 고온면에 분사시켜 이의 액체열이나 증발잠열에 의하여 고온면을 급속히 냉각시키는 방법을 분무냉각이라 하며, 이러한 냉각방법은 다른 냉각방법들에 비하여

냉각능력이 우수할 뿐만 아니라 분무되는 액적유량을 제어하여 고온면의 냉각속도를 비교적 쉽게 조절할 수 있으므로 일관제철소에서의 연속주조, 금속의 열처리, 우주왕복선의 히트싱크장치, 고성능 전자장비의 냉각, 유리제조 등 많은 산업현장에서 널리 사용되고 있다<sup>1)</sup>.

\* 부산기능대학 전자기계과(원고접수일 : 98년 9월)

\*\* 한국해양대학교 운항시스템공학부

주로 물을 냉각액으로 사용하는 이러한 분무냉각은 분무되는 액적의 크기나 미립화하는 방법에 따라서 스프레이 냉각(spray cooling), 미스트 냉각(mist cooling or air mist spray cooling), 포그 냉각(fog cooling) 등으로 분류할 수 있으며, 일반적으로 분무냉각이라 하면 이러한 3가지의 냉각방식 중에서 가장 대표적인 냉각방식이라 할 수 있는 스프레이 냉각을 의미한다. 이러한 분류법은 세계적으로 통일되어 표준화된 방식은 아니지만 전문가들에 의하여 가장 보편적으로 통용되고 있으며, 대부분의 연구자들이 인정하고 있는 분류방식<sup>2)</sup>이므로 본 연구에서도 이와 같은 분류방식을 준용하고자 한다.

물을 가압한 후 1유체(一流體)노즐을 이용하여 고온면에 충돌시켜 냉각시키는 방법인 스프레이 냉각(spray cooling)방법은 분사되는 액적의 직경이 위에서 분류한 3가지 냉각방법 중에서 제일 크며, 분무장치의 구조나 배관 등이 간단하므로 설비비가 적게 드는 반면 분사되는 냉각수량의 제어범위가 좁다는 것이 단점이라고 할 수 있다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 이 방식이 갖고 있는 여러 가지 장점 때문에 그 동안 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있다.

미스트 냉각이란 가압된 공기를 고속으로 2유체(二流體)노즐에 통과시켜 물을 미세한 입자로 미립화하여 고온면에 분사시키는 방식으로서, 분무되는 액적의 직경이 100 $\mu$ m 이하이므로 스프레이 냉각방식보다 고온면을 비교적 균일하게 냉각시킬 수 있으며 노즐의 막힘이 적고 온도제어가 용이한 장점을 갖고 있다. 반면 이 방식은 설치 및 유지비가 많이 들고 공기관에서 소음이 발생하는 단점을 지니고 있다.

또한 포그 냉각이란 미스트 냉각의 일종이라 할 수 있으며, 분무되는 액적의 직경을 매우 작게 하고 공기유속을 미스트 냉각보다 작게 하여 분무시키는 방식으로서 냉각속도의 미세제어가 가능한 장점을 갖고 있다.

이와 같이 물을 분무시켜 고온면을 냉각시키는 방법은 산업현장에서 없어서는 안될 중요한 방식이다. 특히 연속주조공정이나 금속의 열처리 시에는 고온면의 균일한 냉각과 냉각속도의 적절한 제

어가 제품의 질을 결정하는 중요한 요소<sup>3)</sup>이므로 이에 대한 열공학적인 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 관한 연구는 냉각액체측 조건과 냉각물체측 조건이 냉각에 미치는 제반 영향에 대한 연구로 나눌 수 있다. 냉각액체측 조건 중에서 액적유량밀도와 액적속도가 분무냉각특성에 미치는 영향에 관한 연구는 여러 연구자들에 의하여 수행<sup>4)~6)</sup>되어 왔으나 각각의 연구결과가 매우 큰 차이를 보이고 있는 실정이므로 이에 관한 체계적인 연구가 필요하다고 할 수 있으며, 특히 열처리과정에서 중요시되고 있는 고과열도영역에 대한 연구결과는 매우 부족한 실정이다.

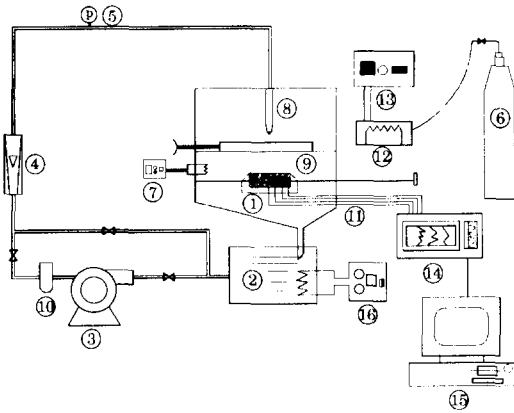
본 연구는 고온평판에 대한 분무냉각시의 열전달특성을 구명하기 위한 1차 연구로서, 액적유량과 냉각수의 과냉도가 고과열도영역에서의 냉각특성에 미치는 영향을 연구하고, 현재까지 비교적 연구성과가 미흡한 각각의 냉각조건에 따른 고온면의 표면열유속과 국소열전달계수를 수치계산을 통하여 구하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig.1은 실험장치의 개략도이다. ①은 Cu로 만든 두께 15mm의 시편이며, 이 시편에는 외경이 1mm인 4개의 씨스형 열전대(K type sheathed thermocouple)를 15mm 간격으로 설치하였다. ②는 이 시편을 850℃까지 가열시키기 위한 전기로이며, ⑥은 알곤가스(argon gas)로서 이것은 시편의 가열과정에서 발생할 수 있는 시편 표면의 급격한 산화를 방지하기 위하여 전기로에 공급되는 분위기 조성용 불활성가스이다. 시편 냉각용 냉각수는 물탱크 ②에서 적절한 온도로 가열된 후 원심펌프 ③에 의하여 가압되어 유량계 ④를 거쳐서 부채꼴형 분무노즐인 ⑧에 의하여 시편의 표면으로 분무되도록 되어 있다. 시편 표면과 분무노즐 사이의 거리는 300mm로 고정시켰으며, 시편 주위의 온도변화가 실험결과에 영향을 미치는 것을 방지하기 위하여 전기히터 ⑦을 이용하여 시편과 노즐 사이의 주위온도를 30℃로 일정하게 유지시켰다.

또한 4개의 열전대①에 의하여 측정된 시편의



- |                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| ① Heat transfer plate | ⑨ Shutter          |
| ② Water tank          | ⑩ Filter           |
| ③ Pump                | ⑪ Thermocouple     |
| ④ Flow meter          | ⑫ Electric furnace |
| ⑤ Pressure gauge      | ⑬ Power supply     |
| ⑥ Argon gas           | ⑭ Pen recorder     |
| ⑦ Electric heater     | ⑮ Computer         |
| ⑧ Flat spray nozzle   | ⑯ Electric heater  |

Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

온도 데이터는 펜기록계⑭를 거쳐서 개인용 컴퓨터⑮에 저장되도록 하였다.

### 2.2 실험방법

본 실험에서는 냉각수의 액적유량밀도와 과냉도가 고온면의 냉각특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 냉각수로 사용한 물의 온도와 유량을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 시편에 분사되는 냉각수의 총 유량은 1, 2, 3, 4 l/min., 냉각수의 온도는 20, 40, 60, 80℃로 하였으며, 냉각수의 용존 산소에 의한 영향을 줄이기 위하여 실험에 사용된 냉각수는 100℃ 이상으로 끓여서 사용하였다.

Fig.2는 시편을 나타내는 그림으로서, 시편의 직경과 두께는 각각 100mm, 15mm 이며, 외경 1mm 인 씨스형 열전대를 정밀가공된 구멍을 통하여 시편 표면하 2mm 되는 지점에 각각 설치하였다. 열전대를 시편의 냉각표면에 설치하여 표면온도를 직접 측정하는 것이 가장 바람직하겠으나 이렇게 하면 열전대가 시편 표면을 흐르는 냉각수의 유동에 영향을 미치게 되어 실험결과의 부정확성을 오히려 크게 하는 결과를 가져 올 수 있으므로 시편의

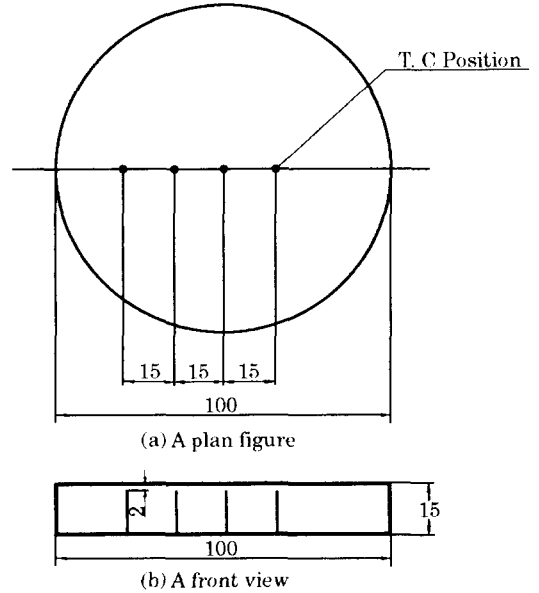


Fig. 2 Detailed Diagram of Heat Transfer Plate

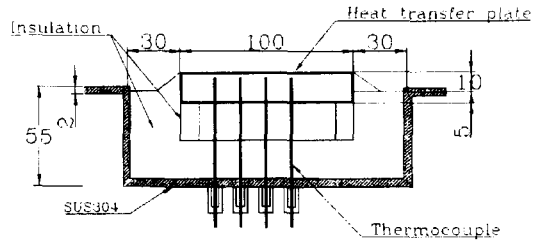


Fig. 3 A Cross Sectional View of Cooling Part

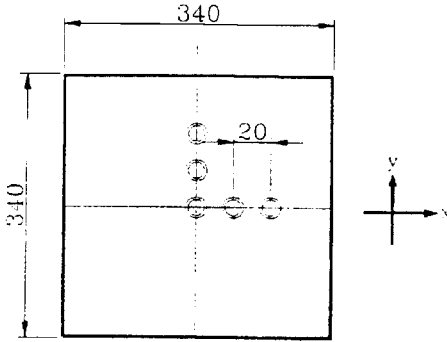
뒷면에 구멍을 뚫고 열전대를 설치하였다. 열전대의 접점과 전열면 사이의 접촉을 원활하게 하기 위하여 특수 제작한 너트를 이용하여 열전대를 밀착시켰으며, 열전대와 구멍 사이의 틈새로 인한 측정 오차를 줄이기 위하여 열전대를 설치한 후 열전대와 구멍 사이를 세라믹 단열재로 밀봉시켰다.

그리고 이 씨스형 열전대로 측정된 온도를 이용하여 열전도역문제 수치계산을 통하여 냉각표면 온도, 표면열유속 및 열전달계수를 구하였다.

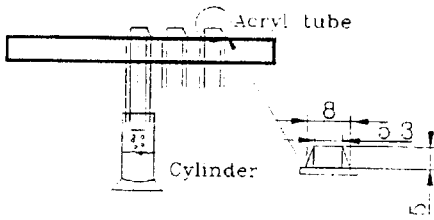
시편의 냉각면을 제외한 다른 모든 표면의 열전달을 차단하기 위하여 단열재를 이용하여 충분히 단열되도록 제작하였으며, Fig.3은 이와 같이 제작한 시편이 설치된 냉각부의 단면도이다.

2.3 액적유량밀도 측정방법

본 실험에서는 냉각수의 분사압력을 조절하여 시편에 분무되는 냉각수의 유량을 1, 2, 3, 4 l/min.으로 조정하였으며, 시편 표면 각 지점에서의 정확한 액적유량밀도를 측정하기 위하여 Fig.4와 같은



(a) A plan figure



(b) A cross-sectional view

Fig. 4 A Measuring Apparatus for Droplets Flux Density

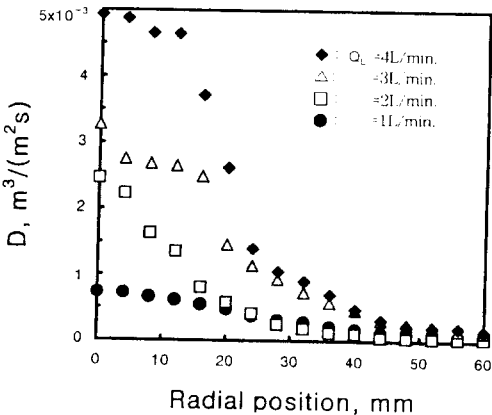


Fig. 5 A Distribution of Droplets Flux Density at x Axis

액적유량밀도 측정장치를 제작하여 사용하였다. 두께 5mm의 아크릴 판으로 제작한 측정판에 구멍을 뚫고, x, y 방향으로 3개씩 20mm 간격으로 내경 5.3mm의 아크릴관을 설치하였다. 그리고 이 측정판을 시편이 설치될 정확한 위치에 고정시키고 실제 실험조건과 동일한 상태에서 1분간 냉각수를 분무시킨 후 각각의 아크릴관에 담겨 있는 냉각수량을 정밀전자저울로 측정하여 단위시간 · 단위면적당 분사되는 액적유량밀도를 계산하였다. 그리고 시편 표면의 전체 위치에서의 액적유량밀도를 측정하기 위하여 x, y 방향으로 각각 4mm씩 측정판을 이동시키면서 이와 같은 실험을 반복하였으며, Fig.5는 이와 같이 측정된 시편의 x 방향 위치별 액적유량밀도를 나타내는 그림이다.

3. 수치해석

본 연구에서는 고온평판의 표면으로부터 일정 거리 떨어진 위치에 설치된 열전대(Thermocouple)로부터 측정된 온도의 시간적 변화를 경계조건으로 하여 평판표면온도, 표면열유속 및 열전달계수를 구하기 위하여 Patankar의 TDMA(Tridiagonal matrix algorithm)방법<sup>9~10)</sup>을 이용하여 열전도 역문제 수치계산을 행하였다. 본 연구에서는, 냉각표면에서 매우 활발한 열전달이 이루어지는 반면 시편의 뒷면을 포함한 다른 모든 면은 단열성이 우수한 단열재로 충분히 단열되어 있으므로 냉각표면으로의 열전달 만이 이루어진다는 전제하에 1차원 수치계산을 행하였다.

발열하지 않는 경우 직교좌표계의 1차원 비정상 열전도방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

본 계산에서는 평판의 옆면과 뒷면에는 단열재가 설치되어 있으므로 뒷면은 단열이라는 조건과 표면열유속  $q_s$  및 임의의 시각  $t$ 에서 측정된 측정점( $x=B$ )의 온도인  $T_m(t)$ 를 경계조건으로 하였다.

$$x=0 : \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$x=L : q_s = 0 \tag{3}$$

$$x=B : T_{(B,t)}=T_m(t) \tag{4}$$

그리고 초기조건으로는 다음과 같이 각 절점의 온도를 일정한 값으로 가정하였다.

$$T_{(i,0)}=T_i^0 \tag{5}$$

이와 같은 수치계산방법에서 식 (5)와 같이 균일한 초기온도분포를 가정하여도 초기조건의 문제는  $t=0$ 으로부터 몇 시간단계까지의 극히 짧은 시간동안의 계산에 영향을 미칠 뿐 그 이후에는 아무런 영향이 없음<sup>11)~12)</sup>이 밝혀졌다.

식 (1)을 제어체적법(control volume method)에 의한 이산화방정식을 얻기 위하여 음함수법을 이용하여 증적분을 행하였으며, 전체적인 계산의 흐름도는 Fig.6과 같다.

일반적으로 금속의 열전도계수와 비열은 온도 변화에 따라 매우 다른 값을 갖게 되므로 온도차이가 매우 큰 경우의 계산에서는 해당온도에 대응한 열전도계수  $k$ 와 비열  $c_p$ 를 택하여 계산하여야 하므로 본 연구에서는 참고문헌<sup>13)~14)</sup>에 나와 있는 Cu

의 물성치를 최소자승법으로 처리하여 다음과 같은 열전도계수와 비열 계산식을 만들어 사용하였으며, 밀도  $\rho$ 는 온도에 따라 그 값이 크게 변화하지 않으므로 일정치를 택하였다.

$$k=399.45 - 0.0529(T+273.0) [W/(m \cdot K)] \tag{6}$$

$$c_p=0.1541(T+273.0)^{0.158} [kJ/(kg \cdot K)] \tag{7}$$

$$\rho=8830 [kg/m^3] \tag{8}$$

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 액적유량과 냉각수의 과냉도에 따른 냉각곡선의 분포

Fig.7은 냉각수의 과냉도  $\Delta T_{sub}$ 를 80K로 일정하게 유지시킨 상태에서 노즐로부터 분무되는 유량을 1, 2, 3, 4 l/min.로 변화시키면서 분무중심에서 측정된 냉각곡선이다. 본 그림에 나타난 바와 같이 노즐에서 분무되는 냉각수 유량이 증가할수록 냉각곡선의 냉각속도는 매우 급격하게 증가하고 있으며, 이러한 증가비율은 액적유량이 작을수록 커지고 있다. 또한 시편 표면의 온도가 매우 높은 고온영역에서는 냉각속도가 매우 느리며, 핵비등영역이라고 생각되는 표면온도 350℃ 부근에서부터 냉각속도가 급격히 증가하고 있다. 이와 같은 현상은 기본적으로 침지냉각시의 현상과 매우 유사하며, 대부분의 열처리과정에서 중요시되는 고온영

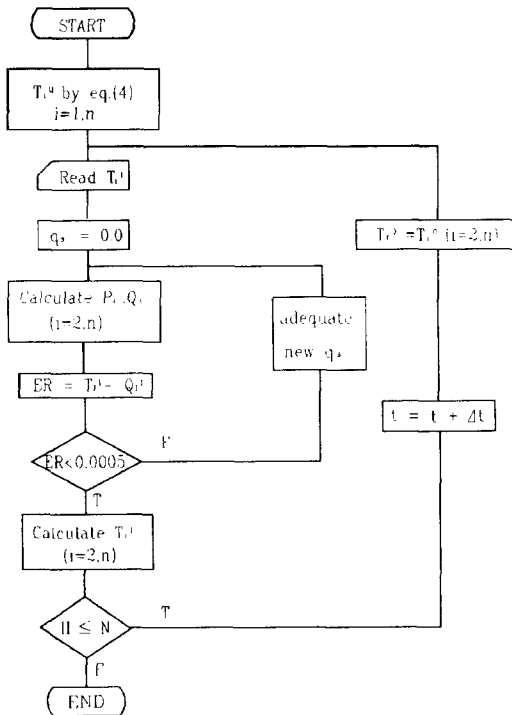


Fig. 6 A Flowchart for Numerical Calculation

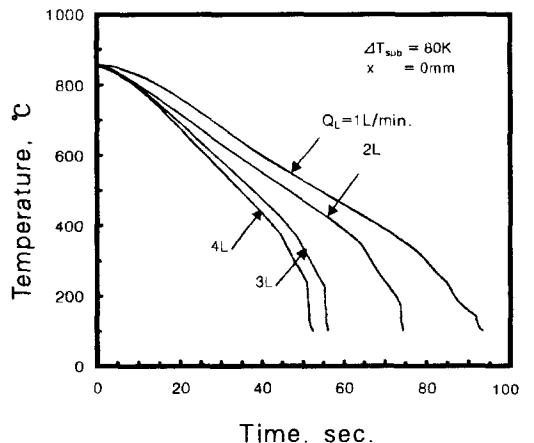


Fig. 7 Cooling Curves at the Center under the Various Liquid Flow Rates

역에서의 냉각속도제어와 냉각효과의 개선을 위해서는 막비등과 천이비등영역의 축소와 전열효과 개선이 중요한 문제라고 할 수 있다.

Fig.8은 냉각수의 과냉도를 20, 40, 60, 80K로 변화하면서 측정된 분무중심의 냉각곡선으로서, 냉각수의 과냉도가 커질수록 서서히 핵비등영역이 고과열도영역측으로 확대되고 있으며, 냉각속도는 냉각수의 온도가 높을수록 급격히 저하되고 있다.

Fig.9는 시편의 분무중심으로부터 0, 15, 30, 45mm되는 지점에서 냉각수량과 과냉도를 일정하게 유지하고 측정된 냉각곡선으로서, 분무중심에서 멀어질수록 액적유량밀도가 작아지므로 시편

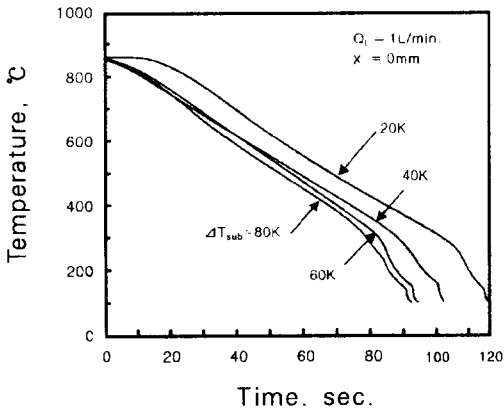


Fig. 8 Cooling Curves at the Center under the Various Subcooling

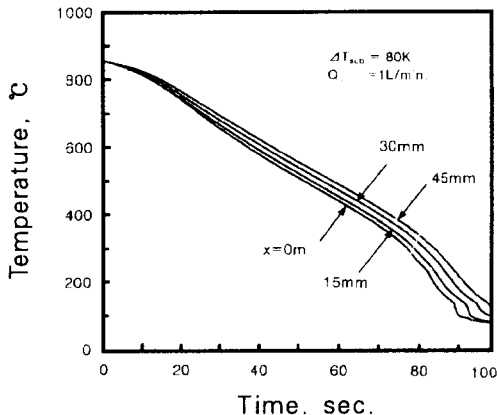


Fig. 9 Cooling Curves at the Each Radial Positions of Flat Heat Plate

의 냉각속도가 완만하여지고 있으며, 액적유량밀도의 차이에 비하여 냉각곡선 경사도의 차이가 작은 것은 시편의 재료인 Cu의 특성상 냉각과정 중 시편 내부에서 열전도현상이 활발하게 일어나기 때문이다.

#### 4.2 액적유량에 따른 표면열유속과 열전달계수의 변화

Fig.10은 노즐로부터 분무되는 냉각수의 과냉도를  $\Delta T_{sub}=80K$ 로 일정하게 유지한 상태에서 유량을 1, 2, 3, 4L/min.으로 변화시키면서 측정된 분무중심의 냉각곡선을 이용하여 표면열유속을 계산한 그림이다. 본 그림에서 알 수 있는 바와 같이 액적유량의 증가에 따라서 고과열도영역보다 핵비등영역에서의 표면열유속 증가비율이 매우 커지고 있으며, 유량이 감소할수록 극소열유속(Minimum Heat Flux, MHF)점이 명확하게 존재하고 있다. 또한 유량에 따라 약간의 차이가 있지만 MHF점은  $\Delta T_{sat}=250K$  부근에서 존재하며, CHF 점은  $\Delta T_{sat}=200K$  영역에서 존재한다. MHF점은 도라 할 수 있는  $\Delta T_{sat}=250K$  와 CHF점은 도라 할 수 있는  $\Delta T_{sat}=200K$  에서의 유량에 대한 표면열유속식을 구하면 다음과 같다.

$$q_{MHF} = 3.5 \times 10^5 Q_L^{0.9699} \quad (9)$$

$$q_{CHF} = 7.4 \times 10^5 Q_L^{0.4927} \quad (10)$$

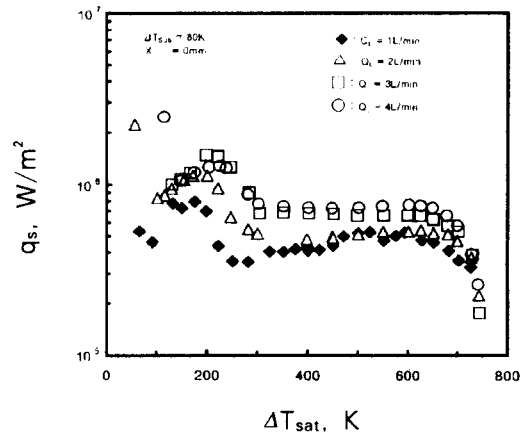


Fig. 10 Surface Heat Fluxes at the Center of Spray under the Various Liquid Flow Rates

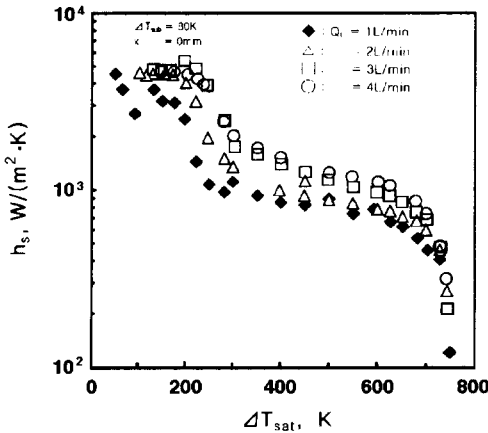


Fig. 11 Heat Transfer Coefficients of Flat Heat Plate under the Various Liquid Flow Rates

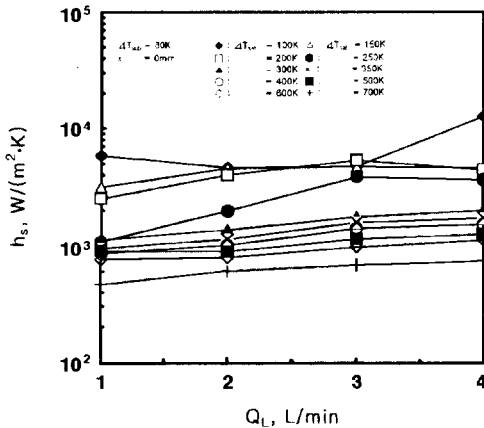


Fig. 12 Heat Transfer Coefficients at Each  $\Delta T_{sat}$

Fig.11은 분무중심에서의 유량별 열전달계수를 나타내고 있으며, 고과열도영역에서는 막비등과 천이비등현상이 발생하여 열전달이 활발히 진행되지 못하다가 핵비등영역이라 할 수 있는 과열도  $\Delta T_{sat}=250\sim 300K$ 이하에서 급격히 열전달계수가 증가함을 알 수 있다. 또한 고과열도영역에서는 유량의 증가에 따른 효과가 크게 나타나지 않다가 저과열도영역으로 이동할수록 유량의 증가에 따른 열전달계수의 개선효과가 크게 나타나고 있다.

Fig.12는 열전달 표면의 과열도에 따른 액적유량  $Q_L$ 과 열전달계수  $h_s$ 와의 상관관계를 나타내고 있으며, Fig.11에서 설명한 바와 같이 고과열도영

역보다는 저과열도영역, 즉 핵비등영역에서 액적유량증가에 따른 열전달계수의 증가현상이 크게 나타나고 있다. 일반적으로 열처리과정에서 중요한 온도영역이라 할 수 있는 과열도  $\Delta T_{sat}=600K$ 에서 분무중심에서의 액적유량에 대한 열전달계수의 관계식은 다음과 같다.

$$h_s = 591.7 + 127Q_L \tag{11}$$

### 5. 결 론

금속의 열처리를 비롯하여 여러 산업현장에서 중요한 과정으로 사용되는 분무냉각에 관한 열전달특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 냉각수량의 증가에 따라서 냉각곡선의 냉각속도는 크게 증가하며, 분무냉각시 고과열도영역에서의 비등현상은 대체적으로 풀비등시의 비등현상과 매우 유사하다.
- 2) 냉각수의 과냉도와 유량에 따라서 약간의 차이는 있으나 대체적으로 MHF점은  $\Delta T_{sat}=250^\circ C$ , CHF점은  $\Delta T_{sat}=200^\circ C$  부근에 존재한다.
- 3) 냉각수의 과냉도  $\Delta T_{sat}=80K$ 에서, 극소열유속점온도와 임계열유속점온도에서의 액적유량에 대한 분무중심의 표면열유속은 다음 식과 같다.

$$q_{MHF} = 3.5 \times 10^5 Q_L^{0.9659}$$

$$q_{CHF} = 7.4 \times 10^5 Q_L^{0.4927}$$

- 4) 분무냉각방법을 이용한 열처리과정에서 중요한 온도영역이라 할 수 있는  $\Delta T_{sat}=600K$ 에서 분무중심에서의 액적유량에 대한 열전달계수의 관계식은 다음과 같다.

$$h_s = 591.7 + 127Q_L$$

### 참고문헌

- 1) 林勇二郎, 瀧本昭, 安尾晃一, “高温加熱面のミスト冷却”, 제27회 일본전열심포지엄 강연논문집, pp.142~144, 1990
- 2) 大久保英敏, “水-空氣系ミスト冷却に及ぼす諸因子の影響に關する實驗的研究”, 동경대학 박사학위 논문, pp.4~7, 1992

- 3) 산업과학기술연구소 제강연구부, "강의 연속주조", 산업과학기술연구소, pp.243~258, 1991
- 4) K. J. Choi and C. Yao, "Mechanisms of film boiling heat transfer of normally impacting spray", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.30, No.2, pp.311~318, 1987
- 5) S. C. Yao and K. J. Choi "Heat transfer experiments of mono-dispersed vertically impacting sprays", Int. J. of Multiphase Flow, Vol.13, No.5, pp.639~648, 1987
- 6) Sugato Deb and S. C. Yao, "Analysis on film boiling heat transfer of impacting spray", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, No. 11, pp.2099~2112, 1996
- 7) 吉岡詠進, 鈴木一誠, 阿部文明, 青山善行, 水上雄一, 二神浩三, "水スプレーによる高温金属の非定常冷却", 제28회 일본전열심포지엄 강연논문집, pp.748~750, 1991
- 8) 庄司正弘, "스프레어링에關する實驗的研究", 제15회 일본전열심포지엄 강연논문집, pp.187~189, 1978
- 9) S. V. Patankar, "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere, New York, pp.41~ 78, 1980
- 10) 香月正司, 中山顯, "熱流動の數値シミュレーション", 森北出版株式會社, 1990
- 11) Ueda, T. and Kim, K. K., "Heat transfer characteristics during the critical heat flux condition in a subcooled flow boiling system", Proc. 8th heat transfer conf., San Fransisco, pp.2203~2208, 1986
- 12) 김명환, 김춘식, 김희철, 민우홍, "수치계산에 의한 비정상 열전도 역문제의 시간간격의 한계에 관한 연구", 한국해양대학 선박공학연구소 논문집 제6집, pp.61~87, 1987
- 13) 일본금속학회편, "金屬データブック", 丸善株式會社, p.105, 1974
- 14) ASME편, "Metals handbook", Vol.1, 9th ed., ASM, pp.145~151, 1978