

고온 열전달면의 각도에 따른 분무냉각 특성에 관한 연구

윤 두 호* · 오 철** · 윤 석 훈**

A Study on the Spray Cooling Characteristics according to the Angle of Hot Heat Transfer Surface

D-H Yoon* · C Oh* · S-H Yoon**

Key words : Spray Cooling(분무냉각), Heat Transfer Characteristics(열전달특성), Droplets Volume Flux(액적유량유속), Heat Flux(열유속), Inclination Angle(경사각)

Abstract

An experimental study of heat transfer from hot flat surface to water sprays was conducted in high temperature region. Heat transfer measurements for hot flat surface were made by 4 sheathed C-A thermocouples. Droplets volume flux were also measured-independently at a position in spray field. The test conditions included variations in droplets volume flux, subcooling of cooling water of 1.565×10^{-3} to $14.089 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ and 80 to 20°C respectively. The effects of inclination angle on heat transfer were investigated and changes in inclination angle of hot flat surface affected heat transfer coefficients of high temperature region.

1. 서 론

미립화된 많은 양의 작은 액적들을 고온면에 분사시켜 이의 액체열이나 증발잠열에 의하여 고온면을 급속히 냉각시키는 분무냉각법은 다른 냉각 방법들에 비하여 냉각능력이 우수할 뿐만 아니라 분무되는 액적유량을 제어하여 고온면의 냉각속도를 비교적 쉽게 조절할 수 있으므로, 일관제철소에서 연속주조공정, 금속의 열처리, 고성능 전자장비의 냉각, 열기관외의 부분냉각, 유리제조 등 많은 산업현장에서 널리 사용되고 있다.^[1] 특히 일관제철

소의 연속주조공정이나 금속의 열처리 시, 고온면의 균일한 냉각과 냉각속도의 적절한 제어는 제품의 품질을 결정하는 중요한 요소^[2]이므로 이에 대한 열공학적인 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다.

또한 이러한 냉각과정에서 냉각면의 자세는 매우 다양한 형태로 존재하게 되며, 냉각면의 형태나 경사도에 따라 열전달특성이 크게 변화하는데 이에 대한 연구결과는 부족한 실정이다.

한편 분무냉각 시 열전달특성에 영향을 미치는 인자들은 냉각재로 사용되는 냉각액체측 인자와 냉각하고자 하는 물체의 표면인 냉각면측 인자로

* 거창기능대학 컴퓨터응용기계설계과
** 한국해양대학교 기관시스템공학부

나눌 수가 있다. 냉각액체측 인자로는 액적유량유속, 액적속도, 액적경, 액적온도, 냉각면과 노즐과의 거리 등이 있으며, 냉각면측 인자로는 냉각표면의 형상, 크기, 냉각표면의 거칠기, 냉각면의 젖음성, 표면열저항층, 냉각면의 자세 등이 있다.¹⁸⁾

냉각액체측 인자에 관한 연구로서, Mudawar 등¹⁴⁾은 액적유량유속의 증가에 따라 열유속이 증가한다고 보고하였으며, 액적온도에 대하여 金¹⁵⁾은 전열면의 분무중심부근 영역에서는 액적유량유속이 고온역 열전달에 큰 영향을 미치지만, 분무중심에서 멀어질수록 그 영향은 둔화된다는 것을 보고하였다. 그리고 냉각면측 인자에 관한 연구로서, 大久保 등¹⁶⁾은 냉각면 거칠기의 크기가 고온영역의 냉각속도에는 영향을 미치지만, 극소열유속점 온도에는 영향을 미치지 않는다고 지적하였다.

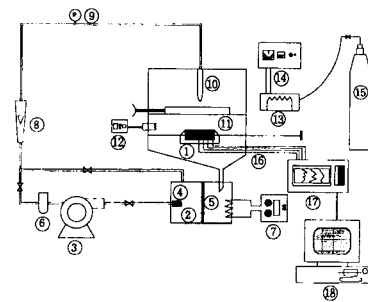
한편 냉각면의 자세에 관한 연구에 대하여 Choi 등¹⁷⁾은 막비등영역에서는 수직면에서의 분무열전달율이 수평면보다 더 크게 되지만 천이영역에서는 수평면이 수직면보다 더 큰 열전달율을 나타낸다고 하였다. 그리고 Yang¹⁸⁾은 열전달면의 경사각이 풀비등임계열유속에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 결과로서, 임계열유속은 열전달면의 경사각이 커질수록 증가하고, 임계열유속의 증가율이 급격하게 변하는 천이각도가 경사각 0°와 30° 사이에 존재한다고 하였다. 이와 같이 분무냉각 열전달특성에 영향을 미치는 인자들에 관한 연구는 많이 이루어져 왔으나 경사면에서의 열전달특성에 관한 연구는, 주로 과열도가 비교적 낮은 영역에서의 분류열전달특성이나 풀비등열전달특성에 관한 연구가 대부분이며, 실험의 어려움 등으로 인하여 고온영역에서의 경사진 전열면의 분무냉각 열전달특성에 관한 연구결과는 거의 찾아 볼 수 없을 정도로 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 일정한 경사각을 갖는 열전달면의 분무냉각 열전달특성에 관한 연구를 수행하여 열전달면의 각도에 따른 냉각영향을 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험장치의 개략도이다. ①은 Cu로 만든 두께 15mm의 시편이고 ⑩은 분무냉각실험 중 시편의 온도측정을 위하여 설치된 4개의 써스형 열전대(K type, sheathed thermocouple)이며, ⑰은 펜기록계(pen recorder), ⑱은 이 실험데이터를 저장하여 정리하기 위한 개인용 컴퓨터이다. ⑫는 분무 시 시편주위의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 전기히터이고 ⑩은 고온의 시편에 냉각수를 분무하기 위한 부채꼴 분무노즐이며, ⑪은 셔터로써, 노즐에서의 분무를 순간적으로 차단하기 위하여 설치하였다. 또한 ⑬은 시편을 850℃로 가열하기 위한 전기로이고 ⑭는 전기로 제어장치이며, ⑮는 가열 시 시편표면의 급속한 산화를 방지하기 위하여 전기로 내부에 계속적으로 공급되는 불활성 가스인 아르곤가스이다. 그리고 ②는 냉각수 탱크이고 냉각수의 온도는 냉각수탱크에 설치된 전기히터 ⑦에 의하여 적절한 과열도를 유지하도록 하였다. ③은 노즐에 분무용 냉각수를 공급하는 원심펌프이고 ④, ⑤는 스트레이너로서 펌프를 통하여 노즐에 공급되는 냉각수 속의 이물질 제거하기 위하여 설치하였다. 또한 펌프 토출측에는 미세한 필터 ⑥을 추가로 설치하였다. 그리고 ⑧은 노즐에 공급하는 냉각수량을 측정하기 위한 유량계이며, ⑨는 노즐에 공급되는 냉각수압력을 측정하기 위



- | | |
|-----------------------|---------------------|
| ① heat transfer plate | ⑩ flat spray nozzle |
| ② water tank | ⑪ shutter |
| ③ pump | ⑫ electric heater |
| ④ strainer | ⑬ electric furnace |
| ⑤ strainer | ⑭ power supply |
| ⑥ filter | ⑮ argon gas |
| ⑦ electric heater | ⑯ thermocouple |
| ⑧ flow meter | ⑰ pen recorder |
| ⑨ pressure gauge | ⑱ computer |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

한 압력계이다.

Fig. 2는 실험한 시편의 그림이다. 이 시편은 열전도계수가 매우 높은 순동으로 제작되었으므로 분무 냉각 시 시편내부에서 활발한 열전도현상이 발생하게 된다. 이와 같은 시편의 특성으로 인하여 냉각실험 시 냉각이 활발한 분무중심 영역이나 비교적 냉각수의 액적유량유속이 작은 분무주변 영역이나 냉각속도가 거의 비슷하게 되는 경향이 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 이와 같은 현상을 방지하고 시편 각 지점의 액적유량유속과 시편온도에 따른 정확한 국소열전달계수를 구하기 위하여 열전대 설치 지점을 기준으로 하여 x, y 방향 6mm되는 위치에, 시편 표면하 1mm되는 깊이까지 폭 3mm로 절개한 후 세라믹 단열재를 설치하여 시편 내부에서의 x, y방향 열전도를 차단하였다. 이와 같이 단열재의 설치 위치보다 열전대의 온도측정점이 1mm정도 시편 내부에 위치하도록 함으로써 옆 방향으로의 열전도에 의한 영향을 최소화하도록 하였다.

Fig. 3은 30°의 경사각을 갖는 시편의 냉각부의 단면도이다. 냉각부의 하부에는 열전대의 접점과 열전달면 사이의 접촉을 원활하게 하기 위하여 특수 제작한 너트를 설치하고, 이 너트를 이용하여

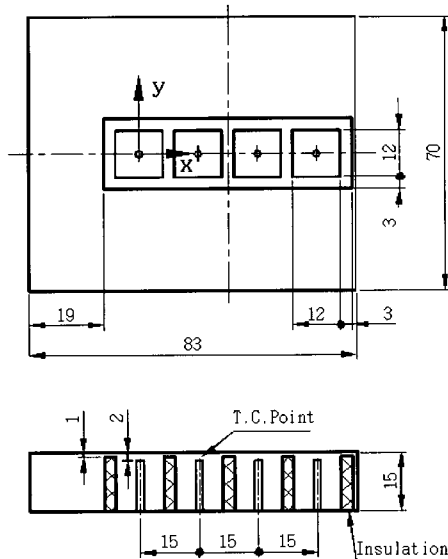


Fig. 2 Detailed diagram of the heat transfer plate

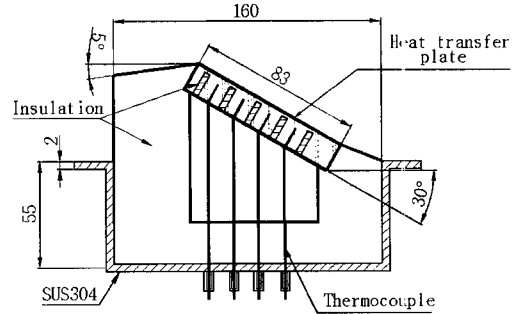


Fig. 3 Cross sectional view of the heat transfer plate at inclination angles 30°

열전대를 밀착시켰으며, 열전대와 열전대가 설치된 구멍 사이의 틈새로 인한 측정오차를 줄이기 위하여 열전대를 설치한 후 열전대와 구멍 사이를 세라믹 단열재로 밀봉시켰다.

2.2 실험 방법

본 실험에서는 시편의 경사각을 0°, 30°, 45°로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한 냉각수의 액적유량유속과 과냉도가 고온면의 냉각 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 냉각수로 사용된 물의 과냉도와 냉각수량을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시편의 가열온도는 850℃로 일정하게 하였고, 시편에 분무되는 냉각수의 과냉도(ΔT_{sub})는 20, 40, 60, 80℃로 하였으며, 분무 냉각수량(Q_f)은 1, 2, 3, 4L/min로 하였다. 그리고 냉각수 중의 용존산소를 제거하기 위하여 냉각수를 100℃상태에서 30분 동안 끓여서 사용하였고, 노즐의 분사 각은 $50 \pm 3^\circ$ 이며, 노즐은 시편표면으로부터 수직 상 방향 300mm의 위치에 설치하였다. 또한 분무냉각실험의 시작 시 열전대가 설치된 4개의 절점온도의 평균 오차는 $850 \pm 0.6^\circ\text{C}$ 이었으며, 냉각수 과냉도의 평균 오차는 $50 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 이내이었다.

2.3 액적유량유속의 측정

본 실험에서는 냉각수의 분사압력을 조절하여 시편에 분무되는 냉각수의 유량을 1, 2, 3, 4 L/min으로 조절하였으며, 시편 표면 각 지점에서의 정확한 액적유량유속을 구하기 위하여 액적유량측정

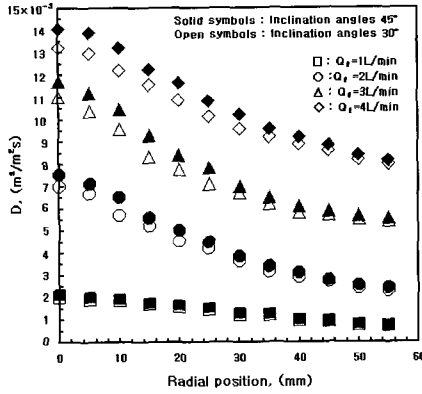


Fig. 4 Diagram of droplets volume flux at x axis on the surface at inclination angles 30°, 45°

장치를 제작하여 실제 실험조건과 동일한 상태로 측정된 값의 평균치를 각 위치에서의 액적량으로 채택하였다. 그리고 이렇게 하여 측정된 액적량을 이용하여 다음 식으로부터 단위시간 · 단위면적당 분무되는 액적유량유속(droplets volume flux)을 계산하였다.

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

상기 식에서 D 는 액적유량유속($m^3/m^2 \cdot s$), V 는 측정된 냉각수의 체적(m^3), A 는 분무면적(m^2), t 는 분무시간(s)이다.

Fig. 4는 시편의 경사각이 30°, 45°일 때의 x 방향의 위치별 액적유량유속을 나타낸 그림이다. 액적유량유속은 경사도가 커질수록 증가하며, 분무중심부에서 멀어질수록 액적유량유속이 감소한다.

2.4 표면열유속 및 열전달계수의 계산

본 연구에서는 고온평판의 표면으로부터 일정 거리 떨어진 위치에서 설치된 열전대(C-A thermocouple)로부터 측정된 온도의 시간적 변화를 경계조건으로 하여 시편내부 임의의 절점의 온도와 시편표면의 온도, 표면열유속 및 열전달을 구하기 위해 Patankar의 TDMA(tridiagonal matrix algorithm)방법^[9-10]을 사용하여 수치계산을 행하였으며, 시편의 냉각표면에서 매우 활발한 열전달이 이루어지는 반면 시편의 뒷면을 포함한

다른 모든 면은 단열성능이 우수한 세라믹단열재로 충분히 단열되어 있으므로 냉각표면으로의 열전달만이 이루어진다는 전제 하에 1차원 비정상 열전도방정식을 적용하였다. 일반적으로 금속의 열전도계수와 비열은 온도변화에 따라서 변화하므로 본 연구에서는 참고문헌^[11-12]에 나와 있는 Cu의 물성치를 최소자승법으로 처리하여 다음과 같은 열전도계수와 비열 계산식을 만들어 사용하였으며, 밀도 ρ 는 온도에 따라 그 값이 크게 변화하지 않으므로 일정치를 택하였다.

$$k = 399.45 - 0.0529(T + 273.0) \quad (W/m \cdot K) \quad (2)$$

$$C_p = 0.1541(T + 273.0)^{0.158} \quad (kJ/kg \cdot K) \quad (3)$$

$$\rho = 8930 \quad (kg/m^3) \quad (4)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경사도별 냉각곡선

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7은 경사각이 각각 0°, 30°, 45°인 시편의 냉각곡선이다.

냉각수의 과냉도(ΔT_{sub})는 80°C이고, 냉각수량(Q_f)이 4L/min일 때, 분무중심($x=0mm$)과 분무중심에서 x 방향으로 15, 30, 45mm되는 지점에서 측정된 시편의 냉각곡선이다.

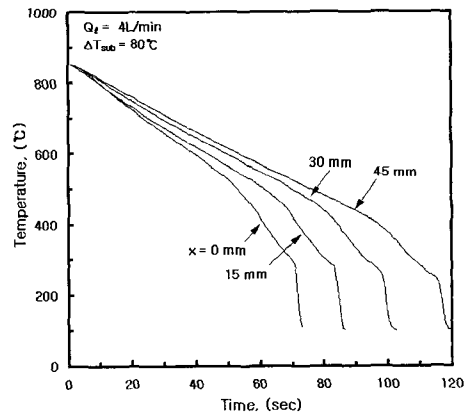


Fig. 5 Cooling curves of the heat transfer plate at inclination angles 0°

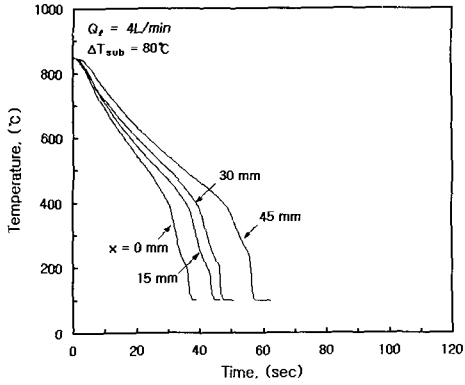


Fig. 6 Cooling curves of the heat transfer plate at inclination angles 30°

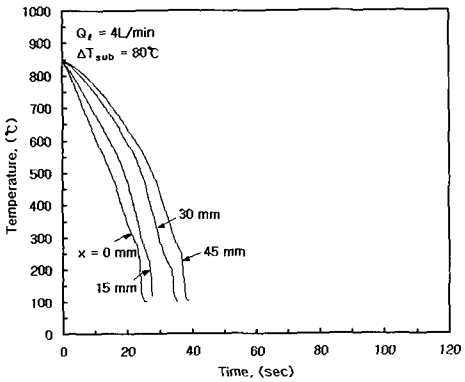
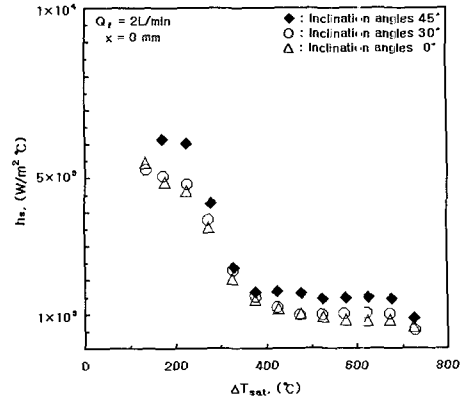


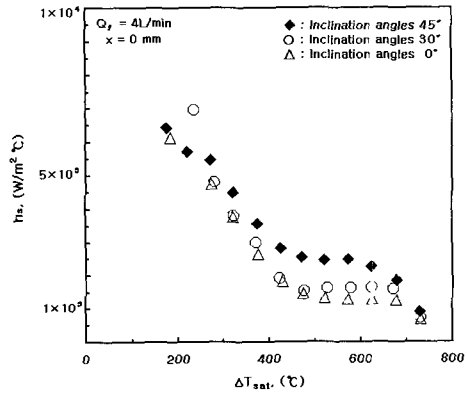
Fig. 7 Cooling curves of the heat transfer plate at inclination angles 45°

이 그림들에서, 분무중심에서 주변영역으로 이동할수록 냉각속도가 저하하고 있으며, 이러한 현상은 분무중심의 액적유량유속이 주변영역보다 크기 때문이다. 그리고 열전달면의 경사각이 커질수록 각 지점에서의 냉각속도 증가폭이 커지는 것은 경사진 열전달면에 분무되어 냉각을 시킨 액적이 중력에 의하여 신속하게 흘러내림으로써 액적의 체류시간이 적어지며, 또한 액적이 신속히 배제됨으로써 출현된 건조한 열전달면에 상대적으로 온도가 낮은 액적이 충돌할 수 있는 기회가 증가하여 액적의 현열 및 잠열에 의한 냉각효과가 증대되기 때문이다.

3.2 경사도별 열전달계수



(a) In case of $Q_f=2L/min$



(b) In case of $Q_f=4L/min$

Fig. 8 Heat transfer coefficients as a function of Q_f at inclination angles 0°, 30°, 45°

Fig. 8의 (a)와 (b)는 분무되는 냉각수의 과냉도가 80°C이고 노즐로부터 분무되는 냉각수량이 각각 2, 4L/min일 때, 시편 분무중심의 열전달계수를 시편의 경사도에 따라 나타낸 그림이다.

이 그림들에서, 냉각수량이 커질수록 열전달계수에 대한 경사도에 의한 영향이 점점 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 동일한 조건하에서, 냉각수량이 증가할수록 고과열도 영역에서의 열전달계수가 증가하고 있으며, 이러한 경향은 경사각 45도의 경우에 특히 더 두드러지게 나타나고 있다. 이와 같은 현상을 고려하여 볼 때, 강재의 열처리나 연속주조공정에서 매우 중요한 냉각영역

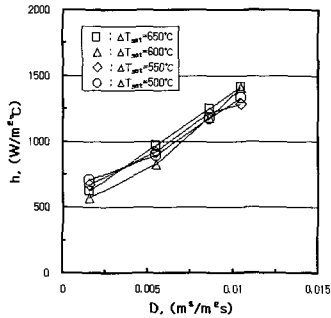


Fig. 9 Comparison of heat transfer coefficients vs. droplets volume flux at inclination angles 0°

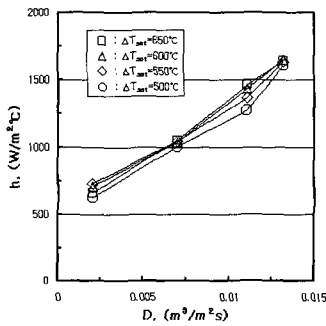


Fig. 10 Comparison of heat transfer coefficients vs. droplets volume flux at inclination angles 30°

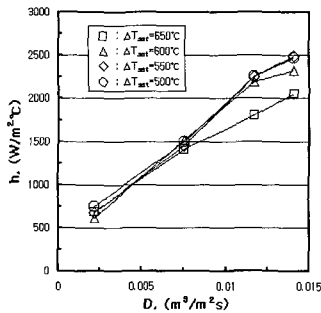


Fig. 11 Comparison of heat transfer coefficients vs. droplets volume flux at inclination angles 45°

인 고과열도 영역에서의 냉각효과의 촉진을 위해서는 열전달표면의 경사각을 크게 하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

3.3 과열도에 따른 경사도별 열전달계수

Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 강재의 열처리과정에서 매우 중요한 온도영역인 과열도 $\Delta T_{sat}=500\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서, 경사각에 따른 열전달계수를 나타낸 그림이다. Fig. 9는 시편의 경사도가 0° 이고 액적유량유속 $D=1.565\times 10^{-3}\sim 10.438\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{m}^2\text{ s}$ 인 경우로서, 액적유량유속이 증가할수록 전체적으로 열전달계수도 함께 증가하는 것을 알 수 있으나, 과열도에 따른 차이는 크지 않다. 이것은 과열도 $\Delta T_{sat}=500\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 영역이 극소열유속점 이후의 막비등영역이므로 과열도의 영향이 거의 나타나지 않고 있기 때문이다.

한편 경사도가 30° 와 45° 인 Fig. 10과 Fig. 11을 비교하여 보면, 전체적으로 열전달계수는 경사각 45° 의 경우가 경사각 30° 의 경우보다 큰 값을 나타내고 있으며, 액적유량유속이 증가할수록 이러한 경향은 커지고 있다. 이러한 현상은, 이 온도영역이 막비등영역임에도 불구하고 경사각이 커질수록 중력에 의한 액적의 유동이 격렬하여 지므로 상대적으로 온도가 낮은 많은 액적들이 열전달면 표면에 신속하게 접촉할 수 있는 조건이 조성되기 때문이다.

3.4 액적유량유속과 과열도에 따른 열전달계수식

Fig. 12는 분무중심에서의 액적유량유속과 과열도가 열전달계수에 미치는 영향을 체계적으로 나

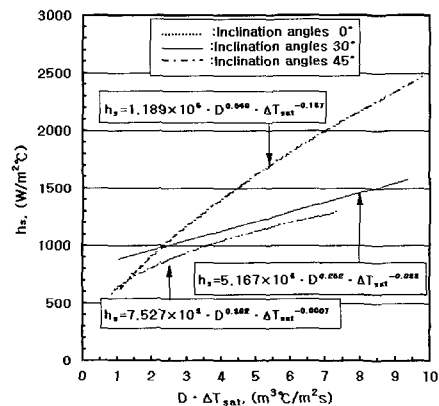


Fig. 12 Heat transfer coefficients vs. droplets volume flux and degree of super heat at inclination angles 0° , 30° , 45°

타낸 그림이다. 이 그림은 냉각수의 과열도 $\Delta T_{sub}=80^{\circ}\text{C}$ 이고 과열도 $\Delta T_{sat}=500\sim 650^{\circ}\text{C}$ 인 경우로서, 전체적으로 $D \cdot \Delta T_{sat}$ 가 커질수록 고온역 열전달계수가 증가하고 있으며, 이러한 경향은 과열도 ΔT_{sat} 의 영향에 비하여 주로 액적유량유속 D 의 증가에 기인한 것이다.

그리고 $D \cdot \Delta T_{sat}$ 의 크기가 작은 영역, 즉 열전달면에 충돌하는 액적유량유속이 매우 작은 영역에서는 경사도의 크기가 고온역 열전달계수에 큰 영향을 미치지 않지만, 이 값들이 증가할수록 경사도의 영향이 크게 나타나고 있는데 이러한 현상의 원인은 경사도가 커질수록 새로운 액적이 전열면에 신속하게 접촉하여 열전달이 촉진되기 때문이다.

본 연구에서 구한 30° 경사진 시편의 분무중심에서의 액적유량유속 및 냉각표면의 과열도($\Delta T_{sat}=500\sim 650^{\circ}\text{C}$)에 따른 고온역 열전달계수의 관계식은 다음과 같으며,

$$h_s = 5.167 \times 10^3 \cdot D^{0.252} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.033} \quad (5)$$

또한 경사각 45° 일 때, 분무중심에서의 액적유량유속 및 냉각표면의 과열도($\Delta T_{sat}=500\sim 650^{\circ}\text{C}$)에 따른 고온역 열전달계수의 관계식은 다음과 같다.

$$h_s = 1.189 \times 10^5 \cdot D^{0.649} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.187} \quad (6)$$

4. 결 론

고온 열전달면의 각도에 따른 분무냉각특성에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열전달면의 경사각이 커질수록 분무된 액적이 중력에 의하여 배제됨으로서 현열 및 잠열에 의한 냉각이 증대되어 냉각속도가 증가한다.
- (2) 분무냉각 시 액적유량유속 및 열전달면의 과열도가 고온역 열전달계수에 미치는 영향으로는, 과열도에 의한 영향은 작으나 액적유량유속의 영향은 크게 작용한다. 그리고 이러한 현상은 열전달면의 경사도가 증가할수록 뚜렷하게 나타난다.
- (3) 경사각 30° 와 45° 일 때, 분무중심에서의 액적유량유속 및 냉각표면의 과열도 ($\Delta T_{sat}=500$

$\sim 650^{\circ}\text{C}$)에 따른 고온역 열전달계수는 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$h_s = 5.167 \times 10^3 \cdot D^{0.252} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.033}$$

$$h_s = 1.189 \times 10^5 \cdot D^{0.649} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.187}$$

참 고 문 헌

- [1] 林勇二郎, 瀧本昭, 安尾晃一, “高温加熱面のミスト冷却”, 第27會 日本傳熱シンポジウム講演論文集, pp. 142-144, 1990
- [2] 산업과학기술연구소 제강연구부, “강의 연속주조”, 산업과학기술연구소, pp. 243-258, 1991
- [3] 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関する實驗的研究”, 東京大學生産技術研究所, pp. 4-7, 1992
- [4] Mudawar, I., and Deiters, T. A., “Optimization of spray quenching for aluminum extrusion, forging, or continuous casting”, J. Heat Treating, Vol. 7, PP. 9-18, 1989
- [5] 金榮燦, “液體顯熱と熱傳達分布に注目した噴霧冷却の研究”, 東京大學博士學位論文, pp. 63-69, 1995
- [6] 大久保英敏, 西尾茂文, “ミスト冷却の冷却能力の高精度豫測に関する研究”, 日本機械學會論文集 (B), 第55卷 517호, pp. 2846-2851, 1989
- [7] K. J. Choi and C. Yao, “Mechanisms of filmboiling heat transfer of normally impacting spray”, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, No. 2, pp. 311-318, 1987
- [8] 양수형, “소형 평판에서의 풀비등 임계열유속에 대한 실험적 연구: 열전달면의 경사각도 및 크기의 영향”, 한국과학기술원 박사학위논문, 1999
- [9] S. V. Patankar, “Numerical heat transfer and fluid flow”, Hemisphere, New York, pp. 41-78, 1980
- [10] 윤석훈, 홍영표, 김경근, 김용모, “고온강재의 담금질 열전달에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, 제17권, 제6호, pp. 1529-1540, 1993
- [11] 일본금속학회편, “金屬データブック”, 丸善株式會社, pp. 105, 1974
- [12] ASME편, “Metals handbook”, Vol. 1, 9th ed., ASME, pp. 145-151, 1978

저 자 소 개



윤두호(尹斗好)

1956년 1월 15일생. 1991년 부경대학교 졸업. 1994년 한국해양대학교 해사대학원 졸업(석사). 2001년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(공학박사). 현재 거창기능대학 컴퓨터응용기계설계과 부교수



오철(吳喆)

1958년 6월 29일생. 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(석사). 1998년 일본 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 1983~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 부교수



윤석훈(尹錫勳)

1954년 8월 22일생. 1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1984년 인하대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1992년 한국해양대학교 대학원 선박기계공학과 졸업(공학박사). 현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 부교수