

평판 분무냉각 시의 고온역 열전달계수에 관한 연구

윤두호* · 오 철** · 윤석훈**

A Study on the High Temperature Region Heat Transfer Coefficients for the Spray Cooling of Hot Flat Plates

D. H. Yoon* · C. Oh** · S. H. Yoon**

Key words : Spray Cooling(분무냉각), Cooling Curve(냉각곡선), High Temperature Region(고온역), Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Surface Heat Flux(표면열유속), Critical Heat Flux(임계열유속), Droplets Volume Flux(액적유량유속), Flat Spray Nozzle(부채꼴분사노즐)

Abstract

In this paper, experiments investigating the high-temperature region heat transfer coefficients for the spray cooling of hot flat plates were performed by down flow spray water using flat spray nozzles. The heat transfer surface is made of copper and is 100mm in length and 40mm in width and 15mm in thickness. The experimental condition of spray are as follows: temperatures of the water droplets are $T=20\sim 80^{\circ}\text{C}$ and droplets volume fluxes are $D=0.001565\sim 0.010438\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Next, correlating equations for the heat transfer characteristics of spray cooling in the high-temperature region are developed from the effects of droplets volume flux and the surface temperature of heat transfer plate

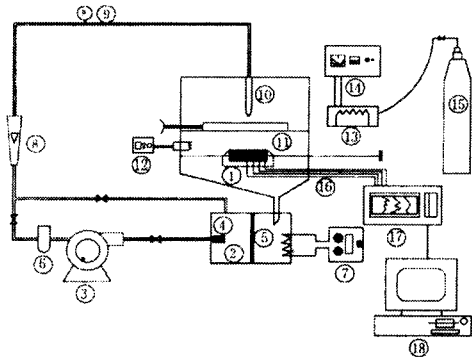
1. 서 론

물을 가압한 상태로 노즐을 통하여 분출시켜 미립화된 액적들을 고온면에 분무하여 냉각하는 방법을 분무냉각법이라 한다. 이 냉각방식은 다른 방법에 비하여 냉각능력이 우수할 뿐만 아니라 액적유량유속을 자유롭게 제어할 수 있으며, 냉각시스

템의 구조가 간단하여 설비비가 적게 드는 장점을 지니고 있으므로 이러한 분무냉각법은 고온 강재의 급속냉각, 연속주조공정, 유리제조 및 기타 여러 산업현장에서 널리 사용되고 있다.^{1)~4)} 분무냉각법에는 냉각재의 분무 시 압축공기를 이용하여 분무입자를 미세화시키는 방법들(Fog cooling, Mist cooling)과 1유체노즐을 이용하여 가압된 물만을

* 거창기능대학 기계설계과(원고접수일 : 2000년 3월)

** 한국해양대학교 기관시스템공학부



- | | |
|-----------------------|---------------------|
| 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

만든 두께 15mm의 시편이며, ②는 냉각수 탱크이고, ③은 노즐에 분무용 냉각수를 공급하는 원심펌프이다. 이 펌프를 통하여 노즐에 공급되는 냉각수 속의 이물질을 제거하기 위하여 펌프의 흡입측에 스트레이너 ④, ⑤를 이중으로 설치하였으며, 펌프 토출측에는 미세한 필터 ⑥을 추가로 설치하였다. 또한 냉각수의 온도는 냉각수탱크에 설치된 전기히터 ⑦에 의하여 적절한 과냉도를 유지하도록 하였다. ⑧은 노즐에 공급하는 냉각수량을 측정하기 위한 유량계이며, ⑨는 노즐에 공급되는 냉각수의 압력을 측정하기 위한 압력계이다. ⑩은 고온의 시편에 냉각수를 분무하기 위한 부채꼴 분무노즐이고, ⑪은 셔터로서, 노즐에서의 분무를 순간적으로 차단하기 위하여 설치하였으며, ⑫는 분무 시 시편 주위의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 전기히터이다. ⑬은 시편을 850°C로 가열하기 위한 전기로이고, ⑭는 전기로 제어장치이며, ⑮는 가열 시 시편표면의 급속한 산화를 방지하기 위하여 전기로 내부에 계속적으로 공급되는 불활성가스인 알곤가스이다. 또한 ⑯은 분무냉각실험 중 시편의 온도측정을 위하여 설치된 4개의 씨스형 열전대(K

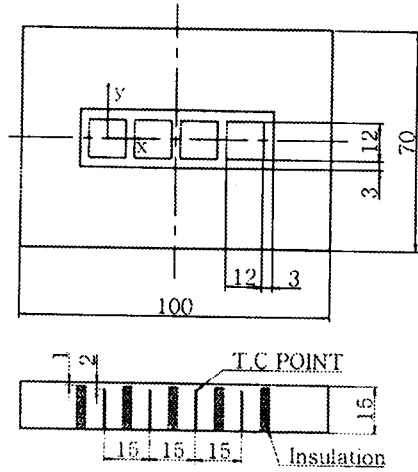


Fig. 2 Detailed diagram of heat transfer plate

type, sheathed thermocouple)이며, ⑰은 펜기록계(pen recorder), ⑱은 이 실험데이터를 저장하여 정리하기 위한 개인용 컴퓨터이다.

Fig. 2는 실험에 사용된 시편을 나타낸 그림이다. 본 연구에서 사용한 시편은 열전도계수가 매우 높은 Cu로 제작되었으므로 분무냉각 시 시편내부에서 활발한 열전도현상이 발생하게 된다. 이와 같은 시편의 특성으로 인하여 냉각실험 시 냉각이 활발한 분무중심영역이나 비교적 냉각수의 액적유량유속이 작은 분무주변영역이나 냉각속도가 거의 비슷하게 되는 경향이 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 이와 같은 현상을 방지하고 시편 각 지점의 액적유량유속과 시편온도에 따른 정확한 국소열전달계수를 구하기 위하여 Fig. 2와 같이 열전대 설치 지점을 기준으로 하여 x, y방향 7.5mm 되는 위치에, 시편표면 하 1mm되는 깊이까지 폭 3mm로 절개한 후 단열재를 삽입하여 시편 내부에서의 x, y방향 열전도를 차단하였다. 이 시편의 두께, 폭, 길이는 각각 15mm, 70mm, 100mm이며, 시편의 냉각면 반대편에 정밀드릴로 열전대 설치 구멍을 가공하여 냉각면 표면 아래 2mm되는 지점에 지름 1.6mm의 씨스형 열전대를 설치하였다. 이와 같이 단열재의 삽입 위치보다 열전대의 온도 측정점이 1mm 정도 시편 내부에 위치하도록 함으로써 옆 방향으로의 열전도에 의한 영향을 최소화하도록 하였다.

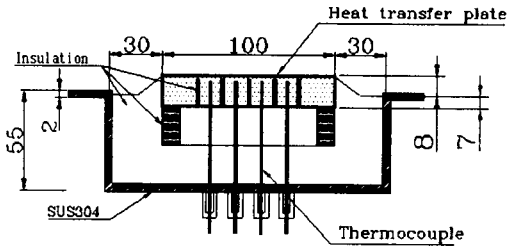


Fig. 3 Cross sectional view of cooling part

Fig. 3은 시편이 장착된 냉각부의 단면도로써, 시편의 냉각면을 제외한 다른 모든 면은 성능이 우수한 세라믹 단열재를 이용하여 충분히 단열을 시켰으며, 분무냉각 시 냉각수의 원활한 배수를 위하여 시편의 표면을 실험장치 표면보다 8mm 높게 설치하였다.

2. 2 실험 방법

본 실험에서는 시편의 가열온도를 850°C로 일정하게 하였고 시편에 분무되는 냉각수의 과냉도는 $\Delta T_{sub} = 20, 40, 60, 80^\circ\text{C}$ 로 하였으며, 분무 냉각수량은 $Q_L = 1, 2, 3, 4\text{L/min}$ 로 하였다. 그리고 냉각수의 용존산소를 제거하기 위하여 냉각수를 100°C상태에서 30분 동안 끓여서 사용하였으며, 노즐의 분사각은 $50^\circ \pm 3^\circ$ 이며, 노즐은 시편표면으로부터 수직 상방향 300mm의 위치에 설치하였다.

시편에 설치된 열전대는 특수 제작한 너트에 의하여 견고하게 고정되었으며, 열전대를 설치한 후의 구멍과 열전대 사이의 틈새는 세라믹 단열재로 밀봉하였다.

2. 3 액적유량유속의 측정

본 실험에서는 시편 표면 각 지점에서의 정확한 액적유량유속을 측정하기 위하여 특별히 제작한 측정장치를 이용하였다. 이 측정장치는 두께 5mm의 아크릴판에 구멍을 뚫고, x, y방향으로 20mm 간격으로 내경 5.3mm의 아크릴관을 3개씩 설치하였다. 그리고 이 측정장치를 시편이 설치될 실험장치의 냉각부에 위치시키고 실험 시와 동일한 조건에서 냉각수를 1분간 분무시켰다. 이렇게 하여 각각의 아크릴관에 담겨있는 냉각수량을 정밀전

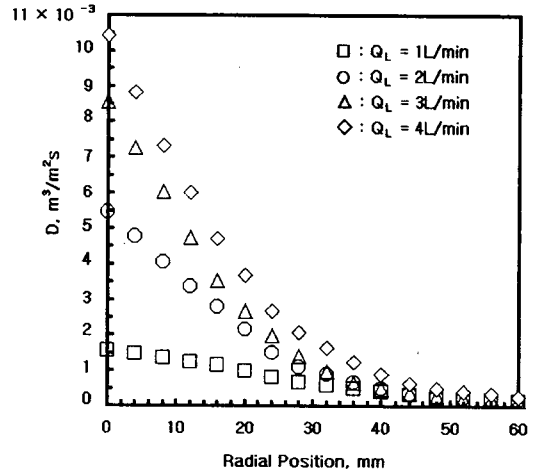


Fig. 4 Diagram of droplets volume flux at x axis

자저울로 중량을 측정하였고, 시편표면의 전체 위치에서의 액적유량유속을 측정하기 위하여 x, y방향으로 각각 4mm 씩 측정판을 이동시키면서 3회 반복하여 측정값의 평균치를 각 위치에서의 액적유량유속을 채택하였다.

단위시간, 단위면적당 분무되는 액적유량유속 (Droplets volume flux)은 다음과 같이 계산된다.

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

상기 식에서 D는 액적유량유속($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), V는 분무 냉각수의 체적(m^3), A는 분무면적(m^2), t는 분무시간(sec.)이다. Fig. 4는 이러한 방법으로 측정된 시편의 x방향의 위치별 액적유량유속을 나타낸 그림이다. 냉각수량이 큰 경우에는 분무중심과 주변영역의 액적유량유속의 차이가 매우 크게 나타나고 있으나 냉각수량이 감소할수록 이러한 경향이 감소하고 있다.

2. 4 표면열유속 및 열전달계수의 계산

냉각수와 고체 표면 사이에 대류열전달이 발생하는 전열면 표면에 직접 열전대를 부착시켜 표면 온도를 측정하는 것은 여러 가지 이유로 인하여 많은 측정오차를 초래하기 때문에 전열면 내부에서 온도를 측정하여 역으로 전열면 표면의 온도와 열유속 등을 계산하는 열전도 역문제 수치해법이 많이 사용하고 있다. 본 연구에서는 표면열유속과 열

전달계수를 구하기 위하여 시편의 표면하 2mm 위치에 설치한 열전대로 측정된 온도의 시간적 변화를 경계조건으로 하여 Patankar의 TDMA (Tridiagonal matrix algorithm)방법^{13),14)}을 사용하였다.

본 연구에서는 전열면을 제외한 모든 면은 단열성이 뛰어난 세라믹 단열재로 충분히 단열을 시켰으므로, 전열면 표면으로만 1차원 열전달이 이루어진다는 조건하에 발열하지 않는 경우의 1차원 비정상 열전도방정식을 적용하였다. 일반적으로 금속의 열전도계수와 비열은 온도변화에 따라서 그 값이 변화하므로 본 계산에서는 Cu의 물성치¹⁵⁾를 최소자승법으로 처리한 다음의 식을 사용하였으며, 밀도 ρ 는 온도에 따라 그 값이 크게 변하지 않으므로 일정치를 그대로 사용하였다.

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

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

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무조건에 따른 냉각속도의 변화

Fig. 5는 냉각수의 과냉도가 $\Delta T_{sub} = 80^\circ\text{C}$ 일 때, 노즐로부터 분무되는 냉각수의 유량에 따른 시편

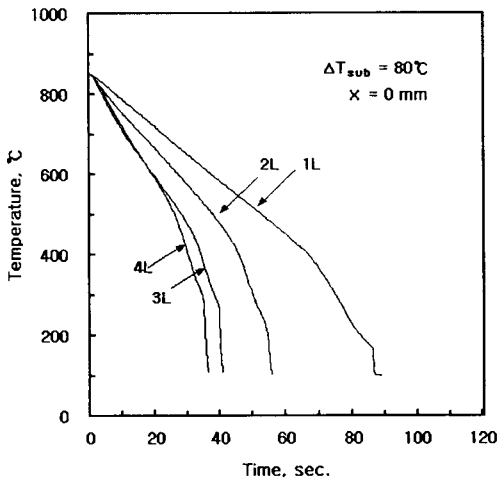


Fig. 5 Cooling curves at the center of the specimen versus liquid flow rates

분무중심의 냉각곡선이다. 시편의 중심부에서, 냉각수의 유량이 증가할수록 냉각속도가 증가되며 시편의 고온영역보다는 쿨칭점(quenching point) 이후의 천이영역에서 냉각속도가 매우 증가하고 있다.

Fig. 6은 냉각수량을 2L/min.으로 하고 냉각수의 과냉도를 20, 40, 60, 80°C로 변화시키면서 측정된 분무중심에서의 냉각곡선이다. 이 그림에서, 냉각수의 과냉도가 커질수록 냉각속도는 증가하고 쿨칭점이 고온측으로 이동하여 천이영역이 확대되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 냉각수의 과냉도가 커질수록 상대적으로 고온영역이 축소되고 냉각속도가 빠른 영역인 천이영역과 저온영역이 확대되므로 냉각면의 급속냉각을 위해서는 냉각수의 과냉도를 크게 하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

3.2 고온역 열전달계수의 변화

Fig. 7은 냉각수의 과냉도가 80°C인 경우, 분무중심부의 액적유량유속 변화에 따른 표면열유속을 계산하여 나타낸 그림으로써, 액적유량유속이 증가할수록 대부분의 온도영역에서 표면열유속이 증가하고 있다. 그리고 이러한 현상은 특히 천이영역이라 할 수 있는 온도영역에서 크게 나타나고 있으며, 비교적 고온영역과 저온영역에서는 그 증가비율이 매우 낮다.

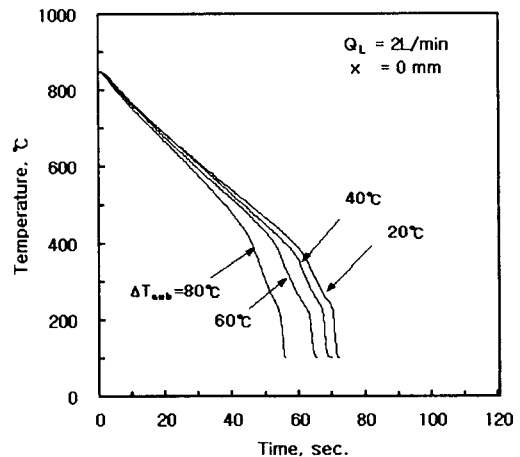


Fig. 6 Cooling curves at the center of the specimen versus liquid subcooling

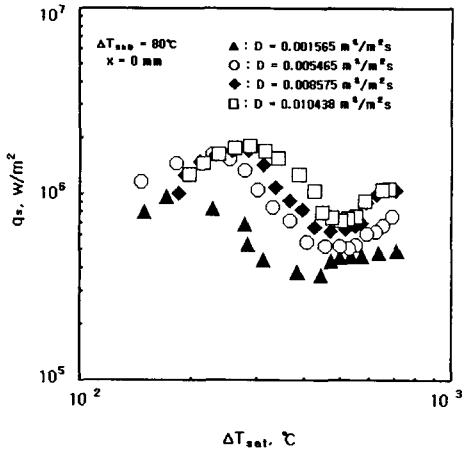


Fig. 7 Surface heat fluxes at the center of spray versus various droplets volume flux

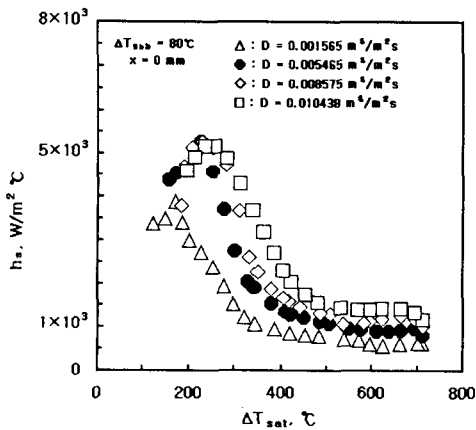


Fig. 8 Heat transfer coefficients at the center of spray versus various droplets volume flux

Fig. 8은 냉각수의 과냉도를 80°C로 일정하게 유지한 상태에서 시편에 분무되는 액적유량유속에 따른 시편 표면의 열전달계수를 나타낸 그림이다. 본 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 시편 표면의 열전달계수 h_s 는 액적유량유속의 증가에 따라 전체적으로 증가하고 있으며, 이러한 현상은 특히 쿨링점 이후의 천이영역에서 크게 나타나고 있다. 이와 같은 경향은 Fig. 7의 표면열유속에 대한 그림의 경향과 유사하며, 분무중심부에서는 액적유량유속이 열전달계수에 큰 영향을 미치는 인자임을 알 수가 있다. 그러나 액적유량유속이 일정치 이상으로 증가하면 열전달계수의 증가폭이 매우 둔화되어 액

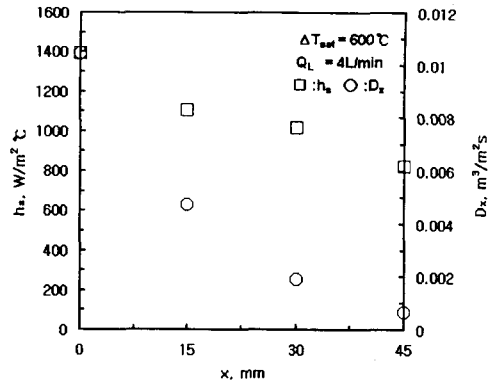


Fig. 9 Heat transfer coefficients and droplets volume flux for each radial positions at $\Delta T_{sat} = 600^\circ C$

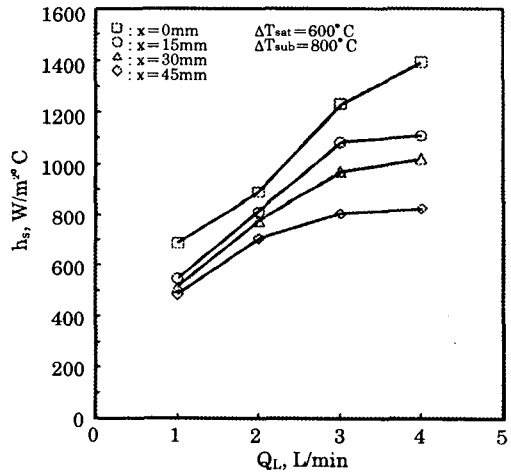


Fig. 10 Heat transfer coefficients and liquid flow rates at x axis

적유량유속의 영향을 매우 적게 받는다.

Fig. 9는 고온영역이라 할 수 있는 과열도 $\Delta T_{sat} = 600^\circ C$ 에서, 냉각수량이 일정할 경우의 x방향 거리에 따른 고온역 열전달계수를 나타낸 그림이다. 분무중심부에서는 액적유량유속과 열전달계수가 모두 큰 값을 가지는 반면 x값이 증가할수록 액적유량유속은 급속히 저하하지만 고온역 열전달계수의 저하폭은 매우 완만하다. 이러한 현상은 분무중심부에 분무된 액적들이 시편의 바깥방향으로 이동하면서 시편 표면을 유동하는 유량이 점점 증가하기 때문이다. 따라서 이러한 이유로 인하여 분무중심부에서는 액적유량유속의 크기가

열전달계수에 큰 영향을 미치지 않지만 분무중심부에서 멀어질수록 액적유량유속의 영향이 상대적으로 작아짐을 알 수 있다. 즉, 분무냉각 시에는 분무되는 액적유량유속의 크기에 따라 열전달계수가 크게 변화하는 분무중심영역과 이러한 영향을 적게 받는 분무주변영역으로 나눌 수 있다.

Fig. 10은 분무중심에서의 거리 x 와 냉각수량에 따른 고온역 열전달계수를 나타낸 그림으로써, 과열도 $\Delta T_{sat}=600^{\circ}\text{C}$ 이고 냉각수의 과냉도 $\Delta T_{sub}=80^{\circ}\text{C}$ 인 경우이다. 본 그림에 나타난 바와 같이 전체적으로 열전달계수의 크기는 냉각수량이 클수록 증가하고 있으나 분무중심부에서 멀어질수록, 즉 x 방향 거리가 커질수록 냉각수량의 증가에 따른 고온역 열전달계수의 증가폭이 매우 감소하고 있음을 알 수가 있다. 이것은 앞 그림에서 설명한 바와 같이, 냉각면의 중심부에서는 냉각수량을 증가시킬수록 냉각효과가 크게 증가하지만 분무중심부에서 멀어질수록 이러한 경향이 줄어들고 있음을 의미한다.

Fig. 11은 고온영역인 과열도 $\Delta T_{sat}=500\sim 700^{\circ}\text{C}$ 에서 액적유량유속과 열전달계수와의 관계를 나타낸 그림으로써, 냉각수량 $Q_L=1\sim 4\text{L}/\text{min}$, 냉각수의 과냉도 $\Delta T_{sub}=80^{\circ}\text{C}$, 액적유량유속 $D=0.00043\sim 0.010438\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ 인 경우이다. 본 그림에는 실험조건이 유사한 스프레이냉각(Spray cooling)에 대한 金⁸⁾의 연구결과와 미스트냉각에

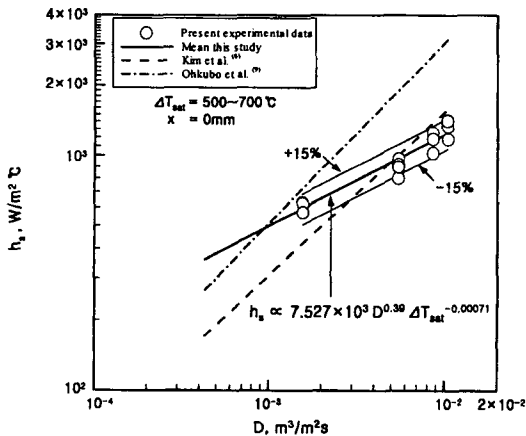


Fig. 11 Heat transfer coefficients and droplets volume flux

대한 大久保 등⁹⁾의 연구결과를 함께 나타내어 비교 검토하였다. 본 실험과 유사한 金⁸⁾의 연구결과와 비교하여 보면, 비교적 액적유량유속이 작은 영역인 $D=0.0045\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ 에서는 본 연구결과가 더 큰 열전달계수를 나타내고 있으며, 이것은 실험에 사용된 시편의 열전도계수의 차이에 의한 것으로 판단된다. 또한 大久保 등의 연구결과와 비교하여 보면, 전체적으로 스프레이 냉각법을 채용한 본 연구결과가 액적유량유속이 작은 영역에서는 비교적 큰 열전달계수값을 갖지만 액적유량유속이 증가할수록 반대의 경향이 나타나고 있다.

본 연구에서 구한 분무냉각 시 분무중심에서의 액적유량유속 및 냉각표면의 과열도에 대한 고온역 열전달계수의 관계식은 다음과 같다.

$$h_s(\Delta T_{sat}=500\sim 700^{\circ}\text{C}) = 7.527 \times 10^3 \cdot D^{0.39} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.00071} \quad (5)$$

4. 결 론

열처리분야를 비롯한 여러 산업현장에서 많이 사용되고 있는 냉각법인 분무냉각 시의 고온역 열전달계수에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 냉각수량과 과냉도가 클수록 냉각속도가 증가하며, 과냉도가 클수록 고온영역이 축소되는 반면 천이영역이 급격히 확대된다.
- 2) 냉각수량이 증가할수록 천이영역에서의 냉각효과는 크게 증가하는 반면 고온영역과 저온영역에서는 그 효과가 매우 작다.
- 3) 분무중심부의 표면열유속은 액적유량유속에 따라 큰 영향을 받는 반면, 분무중심에서 멀어질수록 표면열유속에 대한 액적유량유속의 영향이 급속히 저하한다. 또한 액적유량유속의 영향을 많이 받는 분무중심영역과 상대적으로 액적유량유속의 변화에 대하여 큰 영향을 받지 않는 분무주변영역으로 나눌 수 있다.
- 4) 분무냉각 시 분무중심에서의 액적유량유속 및 냉각면의 과열도에 따른 고온역 열전달계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$h_s = 7.527 \times 10^3 \cdot D^{0.39} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.00071}$$

참고문헌

- 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回 日本傳熱シンポジウム講演論文集, pp. 142~144, 1990
- 2) J. Filippovic, R. Viskanta, “Analysis of subcooled turbulent film boiling on a moving isothermal surface”, Int. J. of Heat and Mass Transfer. Vol. 37, No. 17, pp. 2661~2673, 1994
- 3) S. C. Yao, “Analysis on film boiling heat transfer of impacting sprays”, Int. J. of Heat and Mass Transfer. Vol. 32, No. 11, pp. 2099~2112, 1989
- 4) L. H. J. Wachters, “The heat transfer from a hot wall to impinging mist droplets in the spheroidal state”, Chemical Engineering Science, Vol. 21, pp. 1231~1238, 1996
- 5) 壓司正弘, 通永隆夫, 兒玉 健, “高温加熱面と衝突サブクール液滴間の熱傳達”, 日本機械學會論文集(B), 第50卷 451號, pp. 716~723, 1984
- 6) M. Ciofalo, I. D. Piazza, V. Brucato, “Investigation of the cooling of hot walls by liquid water sprays”, Int. J. of Heat and Mass Transfer. 42, pp. 1157~1175, 1999
- 7) 伊藤猛宏, 高田保之, 北村新三, “高温面の水冷却に関する研究”, 第22回 日本傳熱シンポジウム講演論文集, pp. 100~102, 1985
- 8) 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. 64~67, 1995
- 9) 大久保英敏, 西尾茂文, “ミスト冷却の高温域熱傳達特性に及ぼす諸因子の榮響とその評價法”, 鐵と鋼 Vol. 79, No. 4, pp. 497~503, 1992
- 10) K. J. Choi, S. C. Yao, “Mechanisms of film boiling heat transfer of normally impacting sprays”, Int. J. of Heat and Mass Transfer. Vol. 30, No. 2, pp. 311~318, 1987
- 11) 小坂曉夫, 瀧本昭, 林勇二郎, “高温加熱面のミスト冷却に関する研究”, 日本機械學會論文集(B), 第63卷 612號, pp. 2825~2831, 1997
- 12) 이필중, 김중근, 이승홍, “스프레이에 의한 열간압연 롤의 냉각능 평가”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(B), pp. 388~393, 1996
- 13) S. V. Patankar, “Numerical heat transfer and fluid flow”, Hemisphere, New York, pp. 41~78, 1980
- 14) 윤석훈, 홍영표, 김경근, 김용모, “고온 강재의 담금질 열전달에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집, 제17권, 제6호, pp.1529~1540, 1993
- 15) ASEM편, “Metals handbook”, ASEM Vol. 1, pp. 145~151, 1978

저 자 소 개



윤두호(尹斗好)

1956년 1월 15일생. 1991년 부경대학교 기계공학과 졸업. 1994년 한국해양대학교 산업대학원 해사공학과 졸업(공학석사). 2000년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 박사과정수로. 현재 거창기능대학 기계설계과 조교수.



오철(吳 喆)

1960년 9월 5일생. 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1985년 한국해양대학교 대학원 기관학과 졸업(공학석사). 1988년 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 부교수.



윤석훈(尹錫勳)

1954년 8월 22일생. 1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1984년 인하대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1991년 한국해양대학원 선박기계공학과 졸업(공학박사). 현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 부교수.