

# 경사면에서의 분무냉각 막비등 열전달에 관한 실험적 연구

김 영 찬<sup>†</sup>

안동대학교 기계공학부

## Experimental Study on Film Boiling Heat Transfer of Spray Cooling for Inclined heat transfer Surface

Yeung-Chan Kim<sup>†</sup>

School of Mechanical Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received September 9, 2009; revision received November 30, 2009)

**ABSTRACT:** The film boiling heat transfer was experimentally investigated for the water sprays impacting on an inclined hot surface. Full cone spray nozzles were employed for the spray cooling experiment, and experiments were made for different inclination angles of  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  and  $45^\circ$ . The experimental results show that, in the downstream region of the inclined hot surface, increasing the inclination angle increases the local heat flux slowly because of increasing the number of rebound droplets. However, the inclination angle of heat transfer surface had no remarkable effect on the local heat flux of spray cooling under the present test conditions.

**Key words:** Spray cooling(분무냉각), Film boiling(막비등), Heat transfer(열전달), Inclined surface(경사면), Cooling technique(냉각기술), Full cone spray(원추형분무)

### 기 호 설 명

$D_r$  :  $r$  방향의 액적유량밀도 [ $m^3/(m^2s)$ ]  
 $D_{max}$  : 분무중심에서의 액적유량밀도 [ $m^3/(m^2s)$ ]  
 $h$  : 열전달계수 [ $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ ]  
 $Q$  : 분무액체유량 [ $m^3/s$ ]  
 $q_w$  : 표면 열유속 [ $W/cm^2$ ]  
 $r$  : 분무중심에서의 거리 [ $mm$ ]  
 $T_d$  : 액적의 온도 [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $T_w$  : 냉각면의 표면온도 [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $T_{sat}$  : 액적의 포화온도 [ $^\circ\text{C}$ ]  
 $\Delta T_{sat}$  : 전열면의 과열온도 [ $^\circ\text{C}$ ],  $T_w - T_{sat}$

### 1. 서 론

과거 주로 금속재료의 열처리분야에서 한정적으

로 사용되어온 분무냉각기술이 최근에는 전자기기의 냉각, 식품 및 생체조직의 급속냉동, 고성능 열교환기 등의 광범위한 분야에서 활발히 사용되고 있거나 새로운 분야에의 적용을 목표로 많은 연구가 진행되고 있다. Toda,<sup>(1~2)</sup> Müller and Jescher,<sup>(3)</sup> Bolle and Moureau,<sup>(4)</sup> Ohkubo and Nishio<sup>(5~6)</sup> 등의 많은 연구자에 의해 분무유량, 액적의 충돌속도 및 크기 등이 분무냉각 열전달에 미치는 영향이 일부 파악되었으며, 또한 실험결과에 기초하여 이들 인자들이 포함된 열전달 상관식이 제안하기도 하였다. Kim et al.은 주로 금속재료의 열처리분야에의 적용을 염두에 두고 막비등영역과 MHF(minimum heat flux)점을 대상으로 분무냉각 열전달현상에 대한 실험적 연구<sup>(7~10)</sup>를 수행하였으며, 이러한 연구결과에 기초하여 분무냉각 열전달 모델<sup>(11~12)</sup>과 분무냉각 열전달 상관식<sup>(13)</sup>을 제안하였다. 최근에는 고밀도 전자기기 등의 효과적인 냉각을 위해 FC 냉매를 이용한 분

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-54-820-6013; fax: +82-54-820-5092

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

무냉각에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>(14-16)</sup> 그러나 분무냉각은 열전달 현상이 복잡하고 열전달에 영향을 미치는 인자가 매우 많아 현재까지도 분무냉각 열전달의 메커니즘을 명확히 이해하고 적용하는데 많은 어려움이 있는 실정이다.

본 연구에서는 주로 막비등이 발생하는 고온 영역을 대상으로 경사진 냉각면에 대한 분무냉각 열전달 실험을 수행하여 냉각면의 경사각이 분무냉각 열전달에 미치는 영향을 파악할 예정이다. 현재까지 분무냉각에 있어서 냉각면의 자세에 관한 연구는 상향 수평 또는 수직으로 설치된 냉각면에 대한 연구가 대부분이었으며, 냉각면의 경사각을 조절하여 실험한 연구는 매우 적은 것으로 파악되고 있다. 특히 분무냉각 막비등영역을 대상으로 냉각면 경사각의 영향을 실험한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 2유체 원추형(full cone) 분무노즐을 사용하였으며 분무중심에서의 액적유량밀도  $D_{max} = 0.011 \sim 0.024 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 범위인 분무영역에서 막비등 열전달실험을 수행하였다. 또한 본 연구에서의 실험결과를 수평상향 냉각면을 대상으로 한 선행연구결과<sup>(10)</sup>와 비교하여 냉각면의 경사각이 분무냉각 막비등 열전달에 미치는 영향을 파악하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에 있어서 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 냉각면의 경사각을 조절할 수 있도록 실험장치를 구성하였다. 실험에는 물-공기 2유체 원추형 분무노즐을 사용하였으며, 공기압력과 액체압력을 적절히 조절하여 다양한 형태의 액적유량밀도 분포를 나타낼 수 있도록 하였다. 분무노즐은 일본 Ikeuchi사(BIMJ)의 노즐을 사용하였으며, 공기압 300 kPa, 액압 100 kPa에서 분무각이 20°이며 SMD가 30 ~ 100  $\mu\text{m}$  범위의 액적크기 분포를 가진다. 실험에서는 초기온도 800 °C 정도의 고온 냉각면에 분무액적을 분사함으로써 냉각면을 실온까지 냉각시키는 비정상 실험을 수행하였다.

냉각면은 가로×세로×두께가 70 mm×70 mm×10 mm의 스테인레스강(SUS304)으로 제작하였으며, 적외선 가열장치를 이용하여 가열된다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 동일한 재료로 제작된 고정틀에 고정되어 있으며, 냉각면과 고정틀 사이, 냉각면의 후면 등에는 단열성이 우수한 세라믹 재료를 이용하여

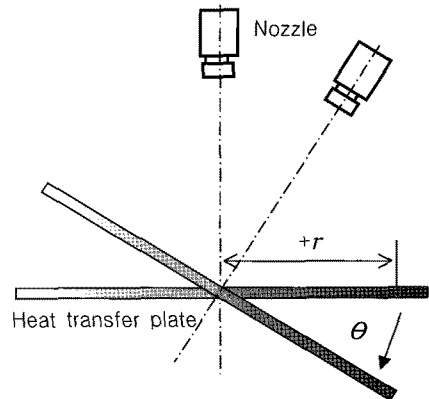


Fig. 1 Spray cooling system of inclined surface.

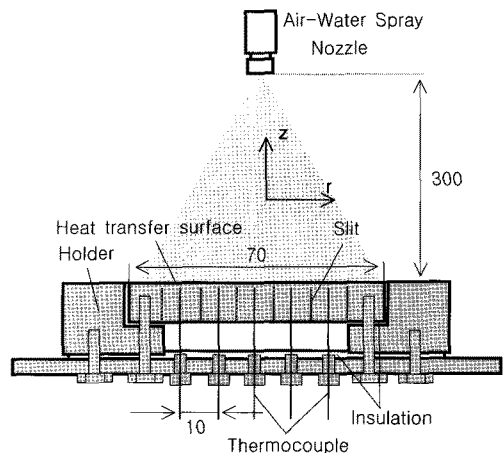


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus.

단열 처리하였다. Fig. 2에서도 알 수 있듯이 냉각면의 후면에는 폭 0.5 mm, 깊이 9 mm의 홈(slit)을 가공하여 전열면 내부에서  $r$ 방향으로의 열전도를 차단하여 수직방향( $z$ 방향)의 일차원적인 열전도가 발생할 수 있도록 배려하였다. 냉각면에는 분무중심에 1개,  $r$ 방향 10 mm 간격으로 좌측에 2개, 우측에 2개의  $K$  type 열전대(직경 0.9 mm)를 냉각면 표면으로부터 약 2 mm의 아래 위치에 설치하여 냉각면의 온도이력을 측정하였다. 열전대는 상술한 홈들로 둘러싸인 영역의 중심부(각 블록의 중심부)에 설치하였으며, 측정된 각 위치의 온도이력을 일차원 열전도 역산법(inverse method)<sup>(17)</sup>에 적용하여 냉각면의 표면온도, 국소 열유속을 계산하였다. 또한 냉각면은 앞서 설명한 바와 같이 경사각을 조절할 수 있도록 구성하였으며,  $\theta$

= 0°, 15°, 30°, 45° 4종류의 경사각에 대한 분무냉각 열전달실험을 수행하였다.

Fig. 3에는 본 실험에서 사용한 원추형 분무노즐의 액적유량분포를 나타내었다. 본 실험에서는 선행연구<sup>(10)</sup>에서 사용한 노즐과 동일한 노즐을 사용하여 실험을 수행하였으며, 그림에는 무차원 액적유량밀도(=  $D_r/D_{max}$ )를 무차원  $r$  방향거리(=  $r/b$ )에 대하여 나타내었다.  $b$ 는 상수이며 액적유량밀도의 측정오차는  $\pm 5\%$  이내로 추정된다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 본 실험에서 사용한 2유체 원추형 노즐에 대한  $r$  방향의 액적유량밀도 분포는 다음의 식<sup>(10)</sup>으로 나타낼 수 있었다.

$$D_r/D_{max} = \exp[-0.693 (r/b)^{1.2}] \quad (1)$$

$$b = -182 \cdot D_{max} + 11.862 \quad (2)$$

액적의 유량분포는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 내경 3.3 mm의 유리관을 이용하여 측정하였으며, 이 유리관은  $r$  방향으로 여러 개를 아크릴판에 부착

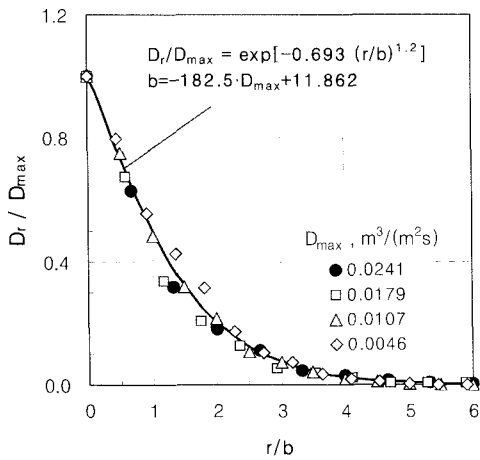


Fig. 3 Distributions of droplet flow rate.<sup>(10)</sup>

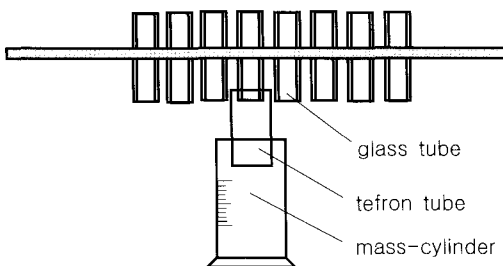


Fig. 4 Measurement of droplet flow rate.<sup>(10)</sup>

하여 측정치를 얻을 수 있도록 제작하였다. 노즐을 통과하는 액체의 전체유량은 액체를 펌프를 이용하여 가압함과 동시에 공기압을 변화시킴으로써 조절할 수 있도록 하였으며,  $D_{max}$  값은 0.011~0.024  $m^3/(m^2s)$ 의 비교적 높은 유량밀도 범위에서 열전달실험을 수행하였다. 이러한 조건에 해당되는 공기압의 범위는 150~300 kPa이며, 액압의 범위는 150~200 kPa이다. 액적의 온도  $T_d = 25^\circ C$ 로 설정하여 실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5에는 경사각  $\theta = 0^\circ$ , 즉 수평으로 설치된 냉각면에 대해서 냉각면 표면으로부터 2 mm의 깊이 에 설치된 열전대를 이용하여 냉각면 내부의 온도를 측정된 대표적인 결과를 나타내었다.

본 실험에서는 앞서 설명한 바와 같이 냉각면의 중심에 1개, 분무중심을 기준으로 10 mm 간격으로 좌측에 2개, 우측에 2개의 열전대를 설치하여 각 지점의 온도이력을 측정하였다. Fig. 5에서는 분무중심의 온도이력을  $r = 0$  mm, 분무중심을 기준으로 우측 방향의 온도이력을  $r = 10$  mm와  $r = 20$  mm, 좌측 방향의 온도이력을  $r = -10$  mm와  $r = -20$  mm로 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 액적유량이 가장 큰 분무중심에서 냉각속도가 가장 빠르며 주변영역으로 갈수록 냉각속도가 점차 느려지고 있다. 또한 분무중심을 기준으로 좌우측의 냉각속도는 거의 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 5에 나타난 냉각면

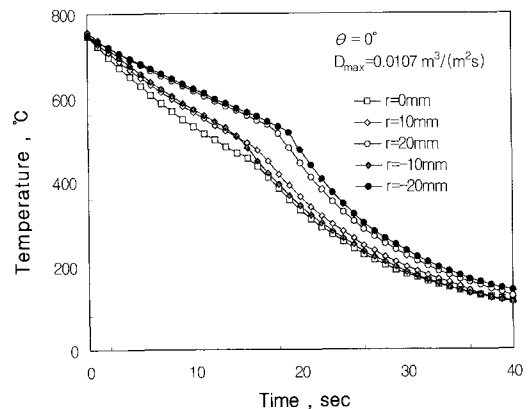


Fig. 5 Temperature-time curve for air-water spray cooling :  $D_{max} = 0.0107 m^3/(m^2s)$ .

내부의 온도 측정값에 기초하여 Beck<sup>(17)</sup>이 제안한 열전도 역산법과 동일한 방법을 이용하여 냉각면의 표면온도 및 열유속을 계산하였다. 또한 실험에 앞서 냉각면의 초기온도를 약 800 °C로 설정하고 냉각면 표면에 임의의 열유속을 인가하여 냉각면 내부의 온도 변화를 계산하였다. 그리고 계산된 냉각면 내부의 온도이력을 열전도 역산법에 적용하여 열유속을 역으로 계산하여 처음 가정한 임의의 열유속과 비교하여 실험오차를 추정하였으며, 그 결과 실험오차는 ±3% 이내였음을 확인하였다.<sup>(9-10)</sup>

Fig. 6에는  $q_w$ 와  $\Delta T_{sat}$ 의 관계를 분무중심에서의 거리  $r$ 을 파라미터로 나타내었다. 그리고 Fig. 6의 (a)에는 수평면( $\theta = 0^\circ$ )에 대한 실험결과를 나타내었으며, Fig. 5의 (b), (c), (d)에는 냉각면의

경사각을 각각 15°, 30°, 45°로 변화시켜 실험한 결과를 나타내었다. Fig. 6에 나타낸 실험결과를 냉각과정에 있어서 0.2초 간격으로 냉각면 내부의 온도를 측정할 후, 이 값을 열전도 역산법 적용하여 표면온도 및 열유속을 계산하였으며 Fig. 6에는 계산결과를 1.0초 간격으로 나타내었다. Fig. 6 (a)에서 알 수 있듯이 수평면일 경우 액적유량이 큰 분무중심에서 열유속이 가장 크며  $r$ 이 증가할수록 액적유량이 감소하기 때문에 열유속도 이와 함께 점차 감소하고 있다. 또한 분무중심을 기준으로 좌우측의 열유속은 거의 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이는 본 실험에서 사용한 원추형 노즐의 액적유량분포가  $r$  방향으로 거의 동일하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Fig. 6의 (b)에서 알 수 있듯이 경사각이 15°인 경

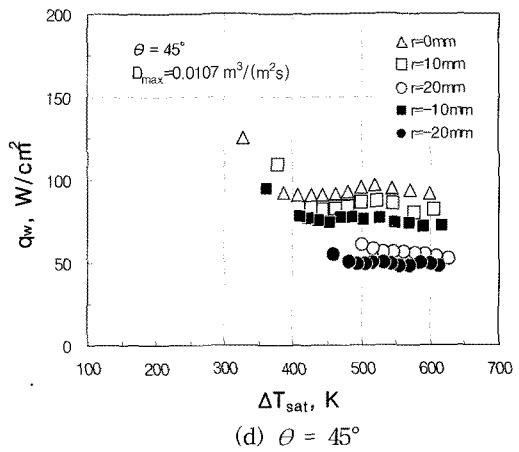
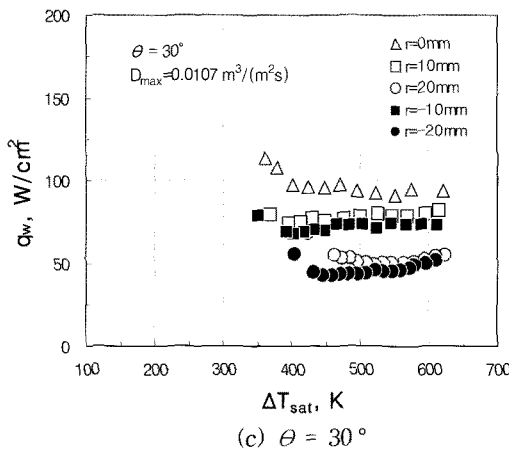
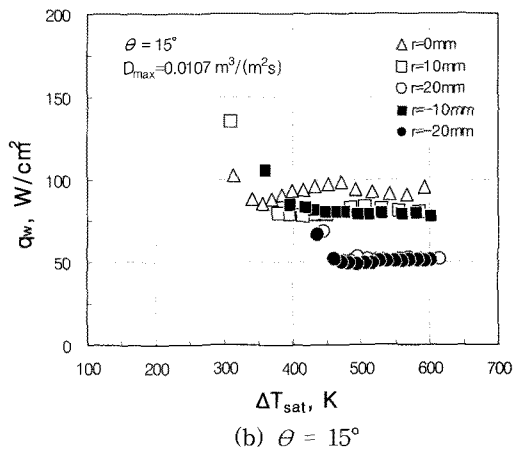
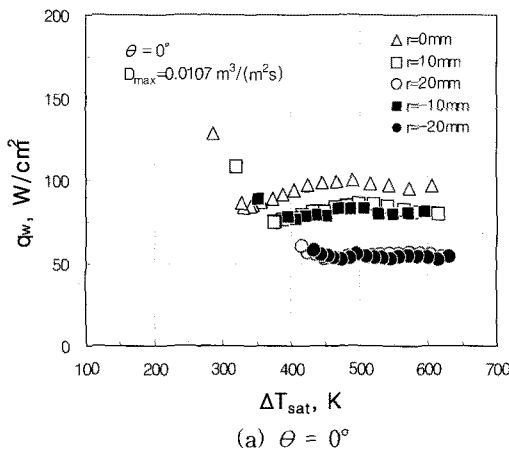
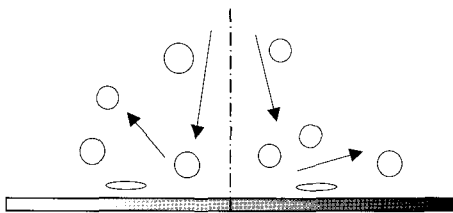
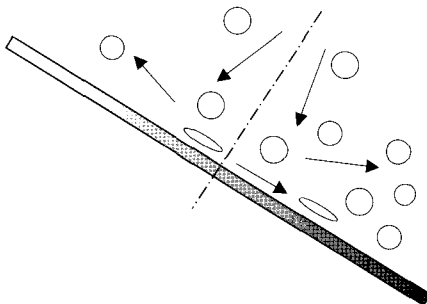


Fig. 6 Local heat flux of spray cooling.

우에 있어서는 수평면을 대상으로 실험한 경우와 마찬가지로 분무중심의 좌우측의 열유속은 거의 동일하며 경사각의 영향은 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다. 냉각면이 시계 회전방향으로  $\theta$  만큼 기울어질 경우, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 좌측은 분무중심을 기준으로 분무중심보다 위쪽에 위치하게 되며, 우측은 아래쪽에 위치하게 된다. 따라서 냉각면의 경사각이 변화하면 분무액적에 대한 충돌거동이 다르게 나타날 것으로 판단된다. 즉 수평면에서는 Fig. 7의 (a)에 나타낸 것처럼 분무중심영역의 냉각면에 일차적으로 충돌한 액적은  $\pm r$  방향으로 균일하게 퍼져 나갈 것으로 예측되지만, Fig. 7의 (b)의 경사면에 액적이 충돌할 경우 분무중심영역에 일차 충돌한 액적은 중력의 영향으로 경사면의 위쪽보다는 아래쪽으로 진행하려는 경향이 강할 것으로 판단된다. 따라서 경사각이 증가할수록 분무중심의 아래 영역에는 재충돌(rebound)에 의한 액적유량이 점차 증가할 것으로 예측된다. Fig. 6의 (b)에 나타낸 경사각 15°의 경우에 있어서는 분무중심을 기준으로 좌우측에 대한 열유속이 거의 동일하지만, Fig. 6의 (c), (d)에 나타낸 경사각이 30°와 45°인 경우는 분무중심의 좌측( $r = -10$  mm,  $-20$  mm)보다 우측영역( $r = 10$  mm,  $20$  mm)의 열유속이 약간 높게



(a) Horizontal heat transfer surface



(b) Inclined heat transfer surface

Fig. 7 Droplet behavior on hot surfaces.

나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 경사각이 증가할수록 경사면 아래 영역에서는 재충돌에 의한 액적유량이 점차 증가하여 열유속이 약간 증가하는 것으로 판단된다.

이러한 현상을 더욱 명확히 파악하기 위해 Fig. 8에는 분무중심의 액적유량  $D_{max} = 0.0241 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 의 경우에 대해 냉각면 각 위치에서의 열유속을 냉각면의 경사각을 파라미터로 하여 나타내었다. Fig. 8의 (a)로부터 알 수 있듯이 분무중심영역( $r = 0$  mm)에서는 경사각이 증가해도 열유속은 거의 일정한 것으로 나타나고 있다. 이는 분무중심영역에서의 열유속은 주로 노즐에서 분사되는 액적의 일차충돌에 지배되기 때문에 경사각의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다. Fig. 8의 (b), (c)에는 각각  $r = 20$  mm,  $r = -20$  mm 영역에서의 열유속을 경사각을 파라미터로 하여 나타내었다. Fig. 8의 (b)에서 알 수 있듯이  $r = 20$  mm, 즉 경사면의 아래쪽 영역에서는 경사각이 증가할수록 열유속이 약간 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8의 (c)에 나타낸  $r = -20$  mm의 영역에서는 경사각이 증가하여도 열유속이 거의 변화하지 않거나 오히려 약간 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 경사각이 증가할수록 경사면 아래쪽에 위치한 영역에서는 재충돌하는 액적이 증가함으로 인해 열유속이 약간 증가하는 것으로 추정되지만, 본 실험 범위의 액적유량, 경사각에서는 그 영향이 그리 크지 않음을 알 수 있었다.

이러한 분무액적의 충돌 후 유동특성과 분무냉각 열전달과의 관계를 명확히 파악하기 위해서는 향후 유동 가시화 등의 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2유체 원추형(full cone) 분무노즐을 사용하여 경사진 냉각면에 대한 분무냉각 막비등 열전달 실험을 수행하였다. 그 결과, 수평으로 설치된 냉각면의 경우 분무중심을 기준으로 좌우측의 열유속이 거의 동일하게 나타나고 있지만 경사면에서는 경사면 아래 영역으로 더 많이 이동하여 국소 열유속을 증가시키는 것으로

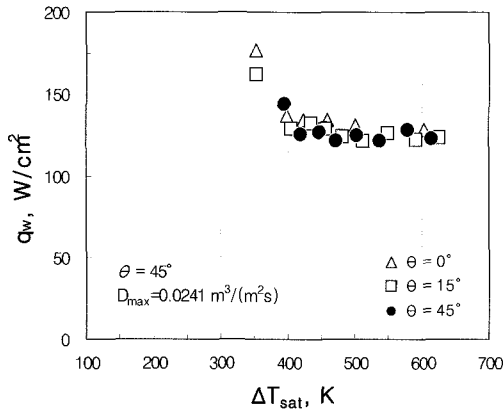
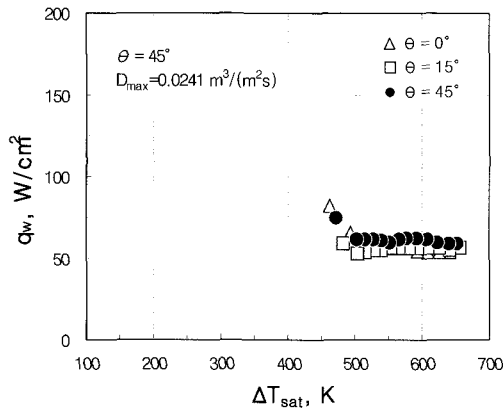
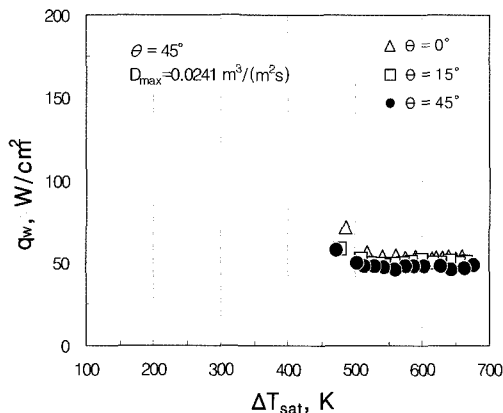
(a)  $r = 0$  mm(b)  $r = 20$  mm(c)  $r = -20$  mm

Fig. 8 Effect of inclination angle on spray cooling heat flux :  $D_{max} = 0.0241$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>s).

추정되지만, 본 실험범위의 액적유량, 경사각에서는 그 영향이 그리 크지 않음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. Toda, S., 1972, A Study of Mist Cooling (1st Report : Investigation of Mist Cooling), Heat Transfer Japanese Research, Vol. 1, pp. 39-52.
2. Toda, S., 1974, A Study of Mist Cooling (2nd Report : Theory of Mist Cooling and its Fundamental Experiments), Heat Transfer Japanese Research, Vol. 3, pp. 1-44.
3. Müller, H. and Jescher, R., 1973, Investigation of the Heat Transfer in a Simulated Secondary Cooling Zone in the Continuous Casting Process, Arch Eisenhüttenwes, Vol. 44, No. 8, pp. 589-594.
4. Bolle, L. and Moureau, J.C., 1977, Spray Cooling of Hot Surface, Two-Phase Flow and Heat Transfer Proc. NATO Advanced Study Institute, Vol. 3, pp. 1327-1346.
5. Ohkubo, H. and Nishio, S., 1990, Study on Accurate Prediction of Heat Transfer Characters of Mist Cooling, JSME International Journal, Vol. 33-2, pp. 326-33.
6. Ohkubo, H. and Nishio, S., 1993, Study on Mist Cooling for Heat Treatment of Metals, J. Materials Processing and Manufacturing Science, Vol. 2, pp. 14-27.
7. Kim, Y.C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1994, Spray Cooling with Formation of Liquid Film Flow : Distribution of Heat Transfer Coefficient in High Temperature Region, Trans. of the JSME(B), Vol. 60, No. 574, pp. 2158-2164.
8. Kim, Y.C., Nishio, S. and Ohkubo, H., 1996, Heat Transfer in High Temperature Region of Spray Cooling Interacting with Liquid Film Flow, Trans. of the JSME(B), Vol. 62, No. 597, pp. 1991-1997.
9. Kim, Y.C., Riu, K.J., Seo, T.W., 2000, Measurements of Heat Transfer Distribution in Spray Cooling of Hot Steel Plate, Korean J.

- of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12-10, pp. 886-893.
10. Kim, Y.C. and Yun, S.M., 2006, Study on Film Boiling Heat Transfer of Spray Cooling in Air-Water Full Cone Spray System, Trans. of the KSME(B), Vol. 30, No. 12, pp. 1236-1242.
  11. 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.
  12. Kim, Y.C., 2005, Film Boiling Heat Transfer Model of Spray Cooling Focusing on Rebound Motion of Droplets, Trans. of the KSME(B), Vol. 29, No. 2, pp. 287-293.
  13. Kim, Y.C. and Yun, S.M., 2006, Study on Correlation of Droplet Flow rate and Film Boiling Heat Transfer in Spray Cooling, Trans. of the KSME(B), Vol. 31, No. 4, pp. 335-340.
  14. Bar-Cohen, A., 1993, Thermal management of electronic Components with Dielectric Liquids, JSME Int. Journal, Series B-36, pp. 1-25.
  15. Wadsworth, D.C. and Mudawar, I., 1990, Cooling of Multi-chip Electronic Module by Means of Confined Two-Dimensional Jets of Dielectric Liquid, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 112, pp. 891-898.
  16. Kim, Y.C. 2007, Study on Boiling Heat Transfer of FC-77 in Spray Cooling, Journal of ILASS-KOREA, Vol. 12, No. 4, pp. 179-184.
  17. Beck, J.V., 1970, Nonlinear Estimation Applied to the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 13, pp. 703-716.