

평판에 분사된 분무충돌제트의 냉각특성에 대한 실험적 연구

전상욱* · 정원석* · 이준식**

An experimental study on cooling characteristics of mist impinging jet on a flat plate

Sang Uk Jun, Won Seok Chung and Joon Sik Lee

Key Words : Mist Impinging Jet(분무충돌제트), Air-Atomizing Nozzle(2 유체분사노즐), Local Heat Transfer Coefficient(국소열전달계수)

Abstract

An experimental study is carried out to investigate the effects of air and water mass flow rates on cooling characteristics of mist impinging jet on a flat plate. Experiments are conducted with air mass flow rates from 0.0 to 3.0 g/s, and water mass flow rates from 5.0 to 20.0 g/s. An air-atomizing nozzle is used for the purpose of controlling air and water mass flow rates. In this study, a new test section is designed to obtain local heat transfer coefficient distributions. Heat transfer characteristics of the mist impinging jet are explained with the aid of flow visualization. Surface temperature and heat transfer coefficient distributions become more uniform as air mass flow rate increases, and that the increases in water flow rate mainly enhance cooling performance. Air mass flow rate weakly influences averaged heat transfer coefficient when water mass flow rate is low, but averaged heat transfer coefficient increases remarkably as air mass flow rate in case of high water mass flow rate.

기호설명

- h : 열전달계수
- m : 질량유량
- q : 공급열량
- R : 시험부의 반지름
- r : 반경방향 좌표
- T : 온도
- z : 높이방향 좌표

하첨자

- avg : 면적 평균
- f : 물
- g : 공기
- u : 계산영역의 윗면
- d : 계산영역의 아래면

1. 서론

분무충돌제트는 충돌제트에 작은 액적을 섞어 함께 분사 시키는 것을 말한다. 이러한 분무충돌제트를 이용하여 고온의 물체를 냉각시키면 냉각되는 표면에서의 높은 열유속으로 인해 냉각 효과가 매우 커지게 된다. 따라서 분무충돌제트를 이용한 냉각은 급속의 열처리 과정, 전자 장비의 냉각 등 다양한 산업현장에서 이용되어 왔으며 그 때문에 비교적 오래 전부터 연구가 이루어진 분야이기도 하다. 하지만 분사되는 제트가 공기와 물로 이루어진 2 상 유동일 뿐만 아니라, 냉각되는 표면에서 끊임없이 액막이 형성되고 증발되면서 상 변화가 일어나기 때문에 그 현상이 매우 복잡하여 현재도 많은 연구자들이 이 분야의 연구를 수행하고 있다.

Toda⁽¹⁾는 원형의 평판에 액막이 형성된 상태에서 표면 온도에 따라 낮은 온도 영역, 천이 영역, 높은 온도 영역으로 구분하여 각 영역에서의

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

냉각 특성을 연구하였으며, Grissom 등⁽²⁾은 분무 증발 냉각이 일어날 수 있는 표면 온도에 대한 연구를 수행하고, 실험 결과와 해석적인 모델링을 통해 얻은 결과를 비교하였다. Fujimoto 등⁽³⁾은 고온 평판에서 분무충돌제트에 대한 실험을 수행하여 그 결과를 액적 크기, 분사 속도와 액적 개수의 함수로 나타내었고, Kosaka 등⁽⁴⁾은 분무충돌제트에 의한 냉각이 일어날 때의 안정성에 관한 연구를 수행하였다. Oliphant 등⁽⁵⁾은 비등이 일어나지 않는 온도 범위에서 액체제트와 분무충돌제트의 냉각 성능을 비교하였다. 그 외에도 Buyevich 등⁽⁶⁾, Nishio 등⁽⁷⁾은 수치적인 방법으로 분무충돌제트에 관한 연구를 수행하기도 하였다.

위에서 언급한 기존의 실험적 연구들을 살펴보면 주로 작은 가열면에서 연구를 수행하여 그 면에서의 평균적인 열전달 자료를 제시한 것을 알 수 있다. 고온의 물체를 냉각시키는 경우, 많은 열이 빠져나가는 것도 중요하지만 표면의 온도분포를 고르게 하는 것 또한 중요하다. 온도 구배가 커지게 되면 그로 인해 열응력이 커지고, 이는 냉각되는 물체에 좋지 않은 영향을 미치기 때문이다. 따라서 냉각되는 면에서의 국소적인 열전달 특성에 대한 보다 많은 연구들이 필요하다.

본 연구에서는 분무충돌제트가 분사되는 가열면에서의 국소적인 냉각 특성을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위해 기존의 실험들과는 다른 방법으로 시험부를 고안하여 가열면 표면에서의 온도를 측정하였으며, 표면에서의 열유속 및 열전달계수의 분포를 구하였다. 이 때, 분사되는 분무충돌제트의 공기유량과 물유량을 변수로 하였으며, 이들의 변화에 따른 냉각 특성의 변화를 살펴보았다.

2. 실험장치 및 실험조건

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험 장치의 개략도이고, 그림에서 보는 바와 같이 실험 장치는 크게 물 공급부, 공기 공급부, 노즐, 시험부로 이루어져 있다. 물 공급부에서는 마그네틱 펌프를 이용하여 수조에 담긴 증류수를 노즐로 공급하였으며, 증류수의 유량은 펌프의 회전 수로 조절하였다. 또한 공기 공급부에서는 실험실에 공급되는 압축 공기를 레귤레이터로 유량을 조절하여 노즐에 공급하였다. 각각의 유체는 여과기를 통과하면서 불순물이 제거되었고, 유체의 유량은 유량계를 이용하여 측정하였다. 실험에 필요한 분무충돌제트를 만들기 위해 원형 단면의 분사구를 가진 내부 혼합형 2 유체 미세분무노즐을 사용하였다. 노즐

내부에서는 증류수에 공기가 충돌하면서 분무가 형성되며, 분사구를 통해 충돌제트의 형태로 분사된다. 노즐은 시험부에서 수직으로 140 mm 위에 설치하였다.

시험부는 정육면체 모양의 구리 합금 블록과 알루미늄 합금 실린더로 이루어져 있는데, 시험부의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 아래의 구리 합금 블록은 위에 고정되어있는 알루미늄 합금 실린더의 밑면을 고르게 가열하기 위한 부분이다. 이를 위해 20 개의 카트리지 히터를 구리 합금 블록에 삽입하고 히터를 가열하여 원하는 만큼의 열량을 시험부에 가해주었다. 밑면의 구리 합금 블록에 의해 가열된 알루미늄 합금 실린더의 윗면에 분무충돌제트를 분사 시키면서 온도를 측정하였다.

실린더의 크기 및 온도 측정 위치를 Fig. 2에 함께 나타내었다. 실린더의 윗면에는 중심에서 한쪽 반경방향으로 매 3 mm마다 폭이 0.5 mm인 홈을, 표면에서 깊이방향으로 15 mm 아래에는 같은 식으로 매 6 mm마다 지름 1 mm의 구멍을 파고 K type의 열전대를 설치한 후 접착제로 고정시켰으며 분무의 대칭성을 확인하기 위해 반대편 반경 방향에도 열전대를 설치하였다. 시험부로부터 대기로의 열손실을 막기 위해 실린더 상단 부분은 테플론 판을 이용하여 단열하였고, 시험부의 나머지 부분은

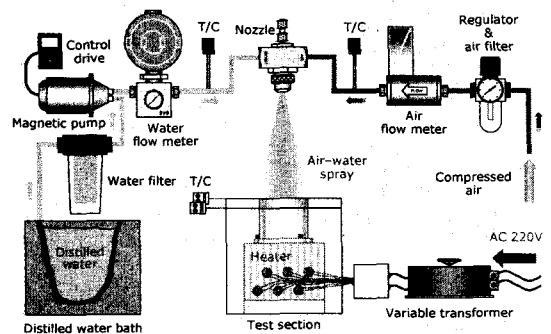


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

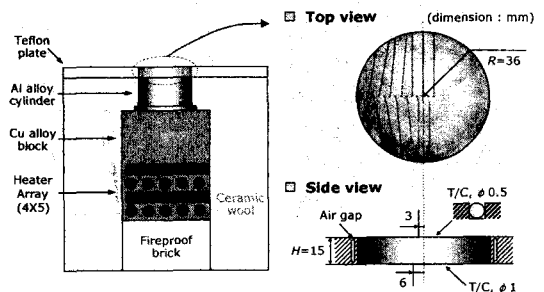


Fig. 2 Schematic diagram of test section

Table 1. Operating conditions

\dot{m}_f (g/s)	5.0	10.0	15.0	20.0
\dot{m}_s (g/s)	0.0~0.5	1.0	2.0	3.0
q (kW)	2.4			
T_f (°C)	28			
T_s (°C)	25			

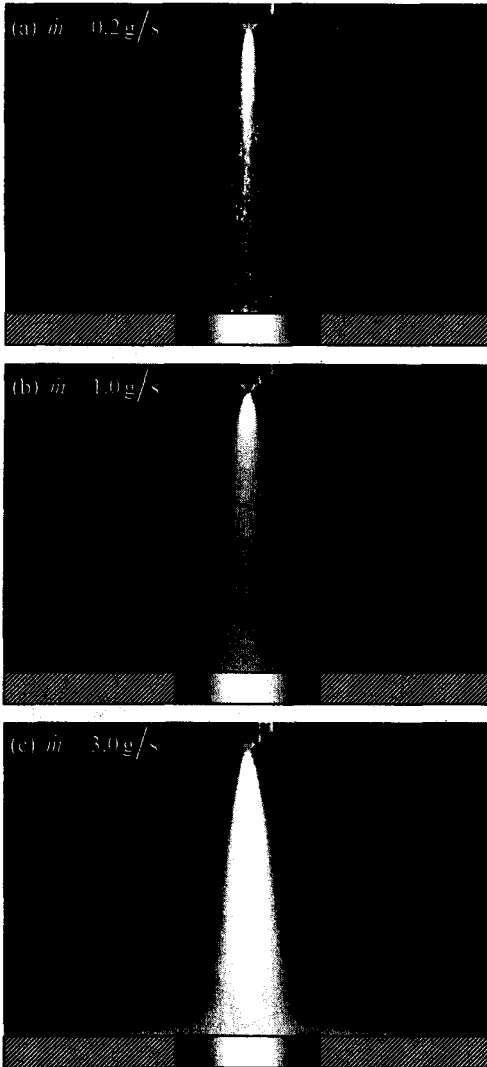


Fig. 3 Visualization of mist impinging jet at $\dot{m}_f = 5.0$ g/s

세라믹 섬유로 단열하였다. 측정장치에서 측정된 모든 신호는 GPIB 통신을 이용하여 컴퓨터로 전송하였으며, 후처리 과정을 통해 원하는 자료를 얻었다.

분무충돌제트의 분사 구조를 알아보고 열전달 실험 결과의 해석에 이용하기 위해 He-Ne 레이저와 디지털 카메라를 이용하여 가시화 실험을 수행하였다. 레이저에서 나오는 원형광을 렌즈를 이용해서 평면모양으로 만든 후, 그 평면광이 분무충돌제트의 중심을 지나도록 하였고, 레이저광이 이루는 평면에 수직인 위치에서 디지털 카메라로 분무충돌제트의 분사 형태를 촬영하였다. 촬영된 이미지는 컴퓨터에서 응용프로그램으로 후처리 하여 원하는 자료를 얻었다. 실험을 수행한 조건을 Table 1.에 나타내었다.

3. 가시화 실험

Fig. 3 은 물유량이 5.0 g/s 일 때 공기의 유량을 변화시키면서 분무충돌제트를 찍은 사진이다. 공기유량이 0.2 g/s 일 때는 공기의 유량이 적기 때문에 완전한 분무충돌제트가 형성되지 않을 뿐만 아니라 액적의 크기 또한 매우 크고 불규칙한 것을 알 수 있다. 하지만 공기유량이 1.0 g/s 으로 증가하면 완전한 형태의 분무충돌제트가 형성되며 액적의 크기도 매우 미세한 것을 알 수 있다. 공기유량이 3.0 g/s 일 때는 제트의 형태가 공기유량이 1.0 g/s 일 때와 크게 다르지 않은 것을 볼 수 있다.

전체적으로 볼 때, 물유량이 증가함에 따라 완전한 분무충돌제트를 형성시키는 데 필요한 공기유량이 점점 많아지는 것을 알 수 있었다. 물유량이 10.0 g/s 이상일 경우에는 제트가 형성되어가는 과정에서 그 중심에 물기둥이 존재하였다. 또한

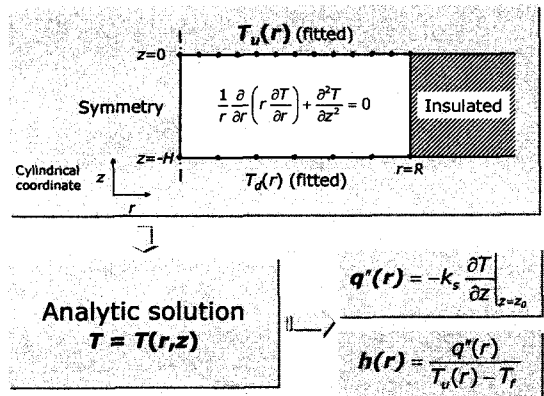


Fig. 4 Schematic diagram of calculating procedure

제트가 형성된 이후에는 공기유량이 증가하여도 제트의 형태는 크게 변하지 않고, 시험부로 분사되는 속도만 빨라지는 것을 볼 수 있었다.

4. 열전달 실험

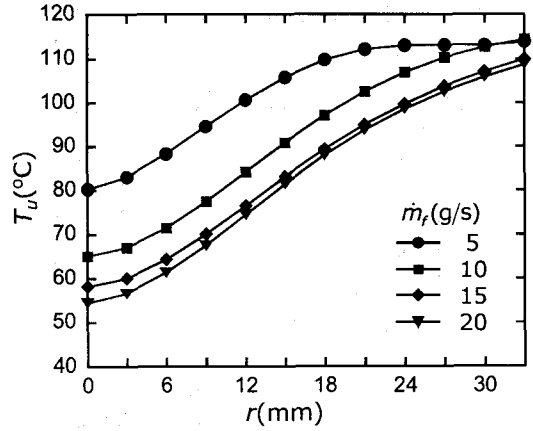
4.1 열전달계수의 계산 방법

본 연구에서는 적절한 경계조건을 이용하여 시험부 내부의 온도를 계산하고, 그로부터 표면에서의 열유속 및 열전달계수를 구했다. 이를 위해 시험부의 알루미늄 합금 실린더의 표면에서부터 깊이 방향으로 15 mm 아래까지를 Fig. 4 와 같이 계산 영역으로 설정하였다. 계산을 위해 실린더의 중심에는 대칭 조건, 벽면에는 단열 조건을 사용하였으며, 윗면과 아래면에는 직접 측정된 온도로부터 온도 분포를 구하여 경계 조건으로 이용하였다. 이 경우에 대해 2 차원 원통 좌표계에서의 열전도 방정식을 해석적으로 풀어 시험부 내부의 온도 분포를 구하였고, 구한 해석해로부터 표면에서의 국소적인 열유속 및 열전달계수를 계산하였다. 열전달계수를 구할 때의 기준 온도로는 물의 온도를 사용하였다.

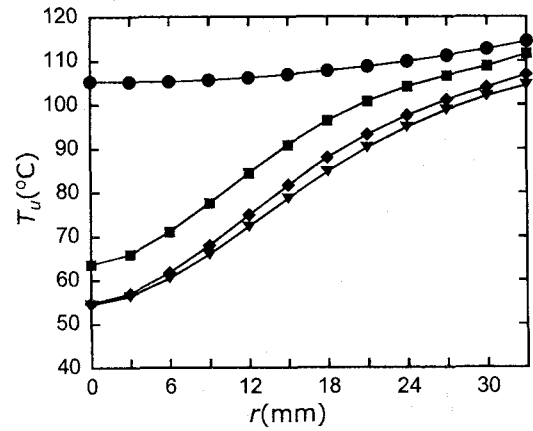
4.2 온도 분포

Fig. 5 는 실험 조건의 변화에 따라 표면의 온도 분포가 변화하는 모습을 나타낸 그림이다. Fig. 5 의 (a), (b), (c) 모두에서 볼 수 있듯이, 공기유량이 일정할 경우에는 물유량이 커짐에 따라 전체적으로 온도가 낮아진다. 또한 물의 유량이 5.0 g/s 인 경우를 제외하면 물유량이 증가하더라도 온도의 분포 형태는 비슷하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이에 비해, 공기의 유량은 주로 온도 분포 형태에 영향을 미치게 되는데, 공기의 유량이 증가함에 따라 전체적으로 온도 분포가 고르게 되어감을 알 수 있다. 이 경우 중심의 온도보다는 바깥쪽의 온도가 더욱 크게 낮아진다. 이러한 온도 분포는 분무충돌제트의 발달 과정과 밀접한 관계가 있다. 공기의 유량이 적은 경우, 표면에 공급되는 물은 중심에 집중이 되기 때문에 중심에서의 온도는 낮아지고 바깥쪽에서의 온도는 높아지게 되지만, 공기유량이 증가함에 따라 같은 유량의 물이라도 표면에 고르게 공급되기 때문에 전체 온도 분포가 고르게 되는 것으로 생각할 수 있다.

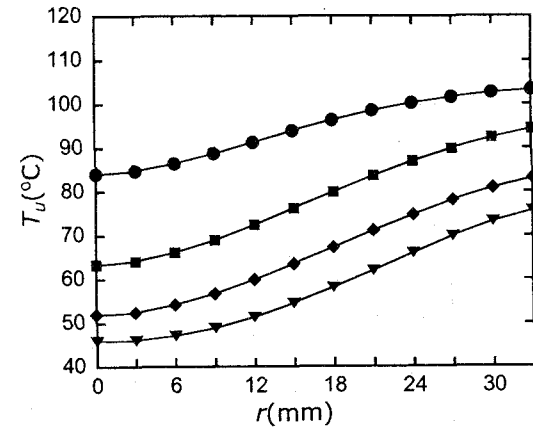
물유량이 5.0 g/s 인 경우에서 볼 수 있듯이, 물유량이 적을 경우엔 공기의 유량이 증가함에 따라 온도 분포의 변화가 독특한 경향을 보이게 되는데



(a) $\dot{m}_g = 0.0 \text{ g/s}$



(b) $\dot{m}_g = 0.4 \text{ g/s}$



(c) $\dot{m}_g = 2.0 \text{ g/s}$

Fig. 5 Temperature distributions at test surface

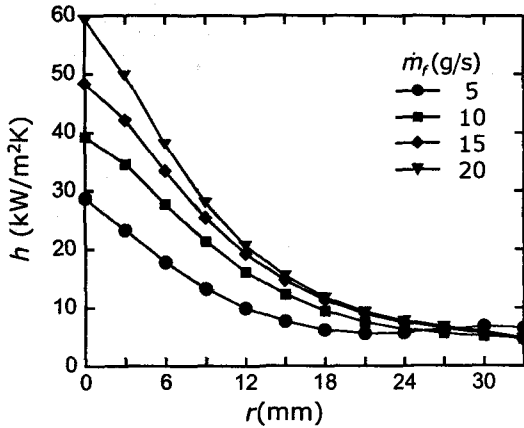
이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 공기유량이 0.0 g/s 인 경우는 분무를 형성하는 데 필요한 공기를 공급하기 않기 때문에 물기둥의 형태로 물이 분사

되어, 중심의 온도가 낮고 바깥으로 갈수록 온도가 높아지는 경향을 보인다. 그러나 공기유량이

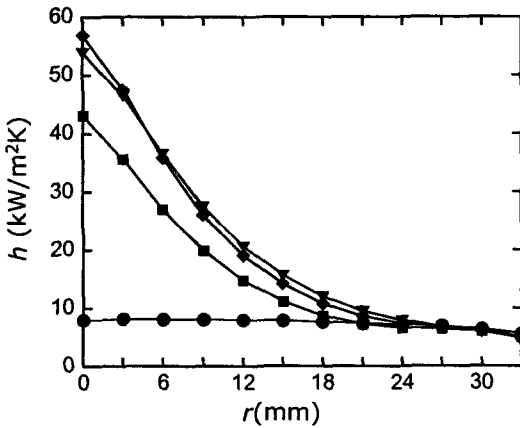
0.4 g/s 일 경우, 공기유량이 작기 때문에 강한 분무충돌제트를 형성하지는 못하지만 액적으로 분열된 물이 전체 표면에 퍼지기 때문에 표면 온도는 비교적 고른 분포를 보이지만, 상대적으로 높은 온도를 유지하는 것으로 생각된다. 공기유량이 20.0 g/s 로 커지면 완전한 분무충돌제트가 형성되어 공기유량이 같으면서 물유량이 다른 경우들과 비슷한 온도 분포를 보이지만, 냉각에 이용되는 물유량이 적기 때문에 온도는 여전히 높은 상태를 유지하게 된다.

4.3 열전달계수 분포

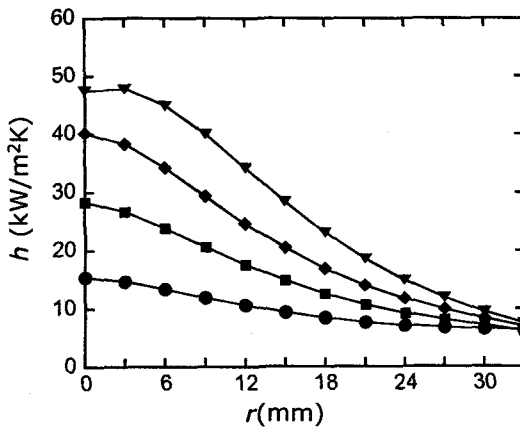
실험 조건의 변화에 따른 열전달계수 분포의 변화를 Fig. 6 에 나타내었다. Fig. 6(a)와 6(b)를 보면 공기유량이 적을 경우는 물유량의 변화가 중심에서의 열전달계수에 주로 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 물유량이 많아짐에 따라 중심에서의 열전달계수가 증가하고 있지만, 반지름이 18 mm 보다 큰 부분에서는 거의 물유량의 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다. 물유량이 5.0 g/s 인 경우는 여기서도 특이한 거동을 나타내고 있는데, 이는 온도 분포에서 설명한 것처럼, 분무충돌제트가 불완전하게 형성되어 충돌제트에 의한 냉각은 잘 이루어지지 않지만, 넓게 분포된 물로 인해 고르게 냉각이 되기 때문이다. Fig. 6(c)는 공기유량이 비교적 많은 2.0 g/s 일 때의 그림이다. 물유량이 증가함에 따라 열전달계수가 전체적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 공기유량이 적을 때와는 다른 곡선형태를 볼 수 있다. 즉, 중심에서는 공기유량이 적을 때에 비해 열전달계수가 작지만, 바깥으로 가면서 열전달계수가 감소하는 정도가 공기유량이 적을 때에 비해서 훨씬 완만하기 때문에 전



(a) $\dot{m}_g = 0.0 \text{ g/s}$



(b) $\dot{m}_g = 0.4 \text{ g/s}$



(c) $\dot{m}_g = 2.0 \text{ g/s}$

Fig. 6 Local heat transfer coefficient distributions at test surface

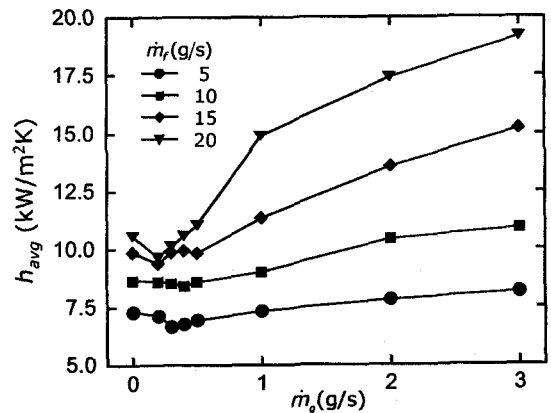


Fig. 7 Averaged heat transfer coefficient distributions at test surface

체적인 냉각성능이 좋아지는 것을 알 수 있다. 전체 면적으로 열전달계수를 평균한 값을, 공기유량을 변수로 하여 Fig. 7 에 나타내었다. 공기유량이 0.0~0.5 g/s 사이에서 열전달계수가 모두 감소했다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 또한 공기유량이 1.0 g/s 이상일 때에는 물유량이 많을수록 공기유량이 증가함에 따라 열전달계수가 증가하는 정도도 커지는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 분무충돌제트가 분사되는 가열면에서의 국소적인 냉각 특성을 알아보기 위해 기존의 방식과는 다른 실험장치를 고안하여 실험을 수행하였다. 실험 결과를 통해 공기유량은 주로 표면온도와 열전달계수의 분포 특성에 영향을 미치며, 물유량은 주로 냉각 성능에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 즉, 공기유량이 많아짐에 따라 표면온도나 열전달계수 분포가 전체적으로 균일해지며, 같은 공기유량에서도 물유량이 많은 경우가 표면 온도도 낮고, 열전달계수도 큰 경향을 보였다. 공기유량과 물유량이 모두 작아서 분무충돌제트가 완전히 발달하지 못한 일부의 경우, 표면온도의 분포는 고르게 되지만 열전달계수가 물만 분사한 경우보다도 작아지는 현상을 보였는데, 이는 충돌제트에 의한 냉각이 이루어지지 못하고, 분열된 액적이 표면에 고르게 퍼지기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 현상들이 분무충돌제트의 발달과정과 밀접한 관계가 있음을 가시화 사진을 통해 확인하였다. 또한 전체적으로 평균 된 열전달계수를 통해, 공기유량이나 물유량 중 어느 한쪽이 너무 적으면 다른 한쪽이 증가하더라도 열전달계수가 거의 변화하지 않지만, 어느 한 쪽의 유량이 많은 경우에는 다른 쪽의 증가에 따라서 열전달계수가 지속적으로 증가하는 것도 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Toda, S., 1972, "A study of Mist Cooling (1st Report : Investigation of Mist Cooling)," *HEAT TRANSFER - Japanese Research*, Vol. 1, No. 3, pp. 39-50.
- (2) Grissom, W. M. and Wierum, F. A., 1981, "Liquid Spray Cooling of a Heated Surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 261-271.
- (3) Fujimoto, H., Hatta, N., Asakawa, H. and Hashimoto, T., 1997, "Predictable Modeling of Heat Transfer Coefficient between Spraying Water and a Hot Surface above the Leidenfrost Temperature," *ISIJ International*, Vol. 37, No. 5, pp. 492-497.
- (4) Kosaka, A., Takegoshi, E., Takimoto, A. and Hayashi, Y., 1997, "Enhancement and Stability of Heat Transfer from a Superheated Surface by Mist Flow," *Proceedings of Transport Phenomena in Thermal Science and Process Engineering*, pp. 559-564.
- (5) Oliphant, K., Webb, B. W. and McQuay, M. Q., 1998, "An Experimental Comparison of Liquid Jet array and Spray Impingement Cooling in the Non-boiling Regime," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 18, pp. 1-10.
- (6) Buyevich, YU. A. and Mankevich, V. N., 1996, "Cooling of a Superheated Surface with a Jet Mist Flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 11, pp. 2353-2362.
- (7) Nishio, S. and Kim, Y.-C., 1998, "Heat Transfer of Dilute Spray Impinging on Hot Surface (Simple Model Focusing on Rebound Motion and Sensible Heat of Droplets)," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 4113-4119.