

물과 알루미늄 나노유체 분무의 분무냉각특성 비교

강보선^{*,†} · 이신표^{**}

Comparison of the Characteristics of Spray Cooling between Water and Nanofluid Sprays

B. S. Kang and S. P. Lee

Key Words: Spray cooling(분무냉각), Nanofluid(나노유체), Nano particles(나노입자), Boiling heat transfer(비등열전달), Cooling efficiency(냉각효율)

Abstract

Nanofluids is that metallic or nonmetallic nanometer-sized particles are dispersed in liquid and they can be used in various fields to increase the heat transfer rate. This study conducted experiments to evaluate whether the cooling efficiency of nanofluids is better than that of water in spray cooling. A heated surface was designed and fabricated to make the temperature distribution be linear, which was confirmed by three thermocouple measurements under the heated surface. Spray cooling experiments were conducted using water, 0.2% wt. (weight), and 0.5% wt. Al_2O_3 nanofluids at the pressure of 0.2 MPa and 0.3 MPa. Based on the results, it is shown that the cooling efficiency of nanofluids is higher than that of water especially in the region of single phase heat transfer. As a result, we can expect that nanofluids can be used as efficient coolants in the cooling of electronic packages where the temperature of the heated surface is not high enough for boiling incipience.

1. 서 론

분무노즐에서 분사되는 액적을 이용하여 고온면을 냉각시키는 분무냉각은 다른 냉각방식과 비교했을 때 비교적 높은 냉각성능을 가지며, 고온면을 균일하게 냉각시킬 수 있고, 분무특성을 적절히 조절하여 고온면의 냉각특성을 용이하게 제어할 수 있는 장점을 보유하고 있다. 분무냉각은 제철산업의 연속주조공정 강관의 열처리, 화재 진화, 원자력발전소 경수로의 용융노심 비상냉각 등⁽¹⁾과 같이 비교적 표면 온도가 매우 높은 경우의

분야에서 오래 전부터 사용되어왔으며, 최근에는 표면 온도를 낮게 유지시킬 필요가 있는 고밀도 전자장치, 고출력 고체 레이저의 냉각 등⁽²⁾ 광범위한 산업분야에서 활발히 활용되고 있다.

분무냉각은 분무 특성(유량, 액적 크기, 액적 속도), 고온면의 조건(온도, 표면거칠기, 습윤성, 경사도), 유체 특성(물성치, 과냉 온도), 주변 환경(온도, 압력) 등의 다양한 변수의 영향을 받으면서 매우 복잡한 상변화를 동반한 유동 및 열전달 현상이 발생하기 때문에 수많은 꾸준한 연구에도 불구하고 분무냉각 메커니즘을 이해하고 응용분야에 적용하는 데는 여전히 많은 어려움이 있는 상황이다.

최근 소량의 나노입자(구리, 알루미늄 등)를 일반 유체에 분산, 부유시켜 유체의 열전달 특성을 향상시키는 효과를 보이는 나노유체를 활용한 연구가 대류열전달 분야에서 활발히 진행되고 있으며, 분무냉각 분야에서 도 일반 유체 대신에 나노유체를 사용한 연구가 발표되

Received: 16 May 2014, Received in revised form: 06 June 2014, Accepted: 07 June 2014)

*전남대 기계공학부

**경기대 기계시스템공학과 교수

†책임저자, 전남대 기계공학부

E-mail : bskang@jnu.ac.kr

TEL : (062)530-1683 FAX : (062)530-1689

고 있다. C. D. Martinez⁽³⁾는 알루미늄(Al_2O_3) 나노유체를 사용한 경우 물과 비교하여 단상 열전달이 42% 정도 증가하며 이는 나노입자로 인해 액적의 고온면과의 접촉각이 증가하고 더 오래 고온면과 접촉하기 때문으로 설명하였다. 또한 나노유체의 경우 비등핵 밀도가 감소하면서 비등 현상이 지연되며 임계열유속(CHF)도 증가함을 보였다. Zhu 등⁽⁴⁾은 비등 현상이 없는 단상 열전달 영역에 대한 분무냉각실험에서 티타늄디옥사이드(TiO_2) 나노유체를 사용한 경우가 물에 비해 열전달계수가 35% 정도 증가함을 보였다. 그들은 나노입자의 존재로 인하여 고온면 위의 경계층이 파괴되고 난류 효과가 강화되는 것을 열전달 증가 이유로 설명하였다.

Bellerová 등⁽⁵⁾은 알루미늄(Al_2O_3)와 티타늄디옥사이드(TiO_2) 나노유체를 사용한 분무냉각실험을 수행했는데, 물과 비교했을 때 오히려 열전달계수가 감소하였으며, 이러한 경향은 고온면적당 질량유량이 증가할수록, 티타늄디옥사이드보다는 알루미늄 나노유체가 감소폭이 더 컸다. Chang 등⁽⁶⁾은 나노유체를 사용한 비등열전달에서는 가열 표면에 얇은 나노입자층이 형성되어 열전달 성능을 감소시키지만, 나노유체를 사용한 분무냉각에서는 층돌 액적이 나노입자층 형성을 억제하기 때문에 열전달 성능이 좋아질 것으로 예측하고, 알루미늄 나노입자 부피비가 분무냉각에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과, 낮은 부피비(0.001%)에서는 열전달이 물보다 증가하였지만, 높은 부피비(0.025, 0.05%)에서는 나노입자의 침착으로 인해 약간 증가하거나 오히려 감소했음을 보였다. 이와 같이, 나노유체를 이용한 분무냉각에 대한 기존의 연구결과는 나노입자를 사용함으로써 분무냉각성능의 개선 여부가 상반된 결과가 보고되고 있으며 여전히 명확하게 규명되지 않고 있다.

본 연구에서는 알루미늄 나노입자의 질량비와 유체 분사압력을 변화시키며 고온면에서 비등 현상이 발생한 직후까지의 고온면 온도에 대해 정상상태로 분무냉각실험을 수행하였다. 고온 벽면에서의 열유속과 열전달계수를 구하여 알루미늄 나노유체의 분무냉각 특성과 물의 분무냉각특성을 비교하였다.

2. 실험장치 및 조건

실험 장치는 Fig. 1에 나타내었듯이 분무 노즐로의 유체 공급시스템, 고온 벽면 실험체적과 전기 공급부, 온도 측정시스템으로 구성된다. 고온 벽면은 열전도도가

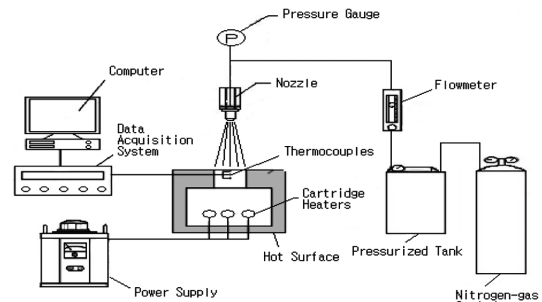


Fig. 1 Schematic of Experimental System

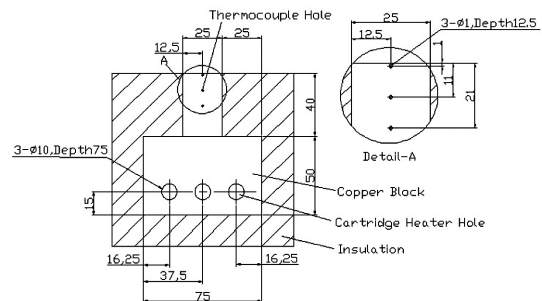


Fig. 2 Details of heating block

높고 절삭성이 좋은 구리로 제작하였으며 세부적인 치수는 Fig. 2에 나타내었다. 고온 벽면은 한 변이 25 mm인 정사각형이며 길이가 40 mm인 직육면체의 상부가 된다. 히터가 설치되는 아래 직육면체는 한 변이 75 mm인 정사각형, 길이가 50 mm인 직육면체이다. 고온 벽면의 길이 방향 선형성을 유지하기 위하여 구리 블록 주변을 잘 단열하여야 한다. 고온 벽면 주변의 단열재로는 저렴하면서도 복잡한 형상을 제작하기가 용이한 단열 모르타르를 사용하였다.

구리 블록을 가열하기 위해 카트리지 히터(D=10 mm, L=70 mm, 250 W) 3개가 사용되었으며 슬라이드스위치 전압을 조절하여 고온 벽면 온도를 변경시켰다. 고온 벽면온도를 측정하기 위하여 3개의 열전대(K Type, D=1.0 mm, L=12.5 mm)를 고온 벽면으로부터 1, 11, 21 mm 아래에 설치하여 각각 T_1 , T_2 , T_3 를 측정하였으며, 1개의 열전대로 유체의 온도와 상온을 측정하였다. 열전대로부터의 신호는 데이터 수집장치(Agilent, 34970A)를 사용하여 수집되며, PC와 연결시켜 각 열전대의 온도를 표와 그래프로 관찰하면서 실험을 수행하였다. 예비실험을 통하여 1차원 열전도 특성인 온도의 선형성을 확인하였으며 선형 온도분포로부터 벽면에서의 열유속

q'' , 고온 벽면의 온도 T_s , 열전달계수 h 를 아래 식 (1)~(3)에서 계산할 수 있다.

$$q'' = -k \frac{\Delta T_{1,2}}{L_{1,2}} \quad (1)$$

$$T_s = T_1 + \frac{q''}{-k} \times L_{s,1} \quad (2)$$

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_f)} \quad (3)$$

여기서, k 는 구리의 열전도도, $L_{s,1}$ 은 표면과 첫 번째 열전대(T_1)와의 거리, $L_{1,2}$ 은 첫 번째(T_1)와 두 번째 열전대(T_2)와의 거리, $\Delta T_{1,2}$ 는 첫 번째와 두 번째 열전대의 온도차($T_2 - T_1$), T_f 는 상온에서의 유체온도이다.

유체를 보다 안정되게 분사 노즐로 공급하기 위하여 고압 질소를 이용하여 액체저장용기를 일정한 압력으로 가압하였으며, 가압된 용기로부터 유체가 유량계(rotameter)를 거쳐서 분무 노즐로 공급된다. 고온 벽면으로 유체를 분사시키기 위해 솔리드 원추형 분무 노즐(Spraying System, TG-SS1, D=0.51mm, 0.54~1.3 L/min)을 사용했으며 노즐은 고온 벽면에서 위로 20 cm 떨어져 있다. 분사 압력은 분무 노즐 직전 입구에서 측정되었다. 고온 벽면 면적(2525 mm²)에 분사되는 유체의 질량유량은 분사압력 0.2, 0.3 MPa일 때, 각각 0.52, 0.57 g/s이다.

나노유체에 사용한 나노 입자는 알루미늄(Al_2O_3)이며 평균 직경은 30 nm이다. 나노유체는 입자를 해당 질량비로 물과 잘 섞은 후 초음파에너지를 가하여 입자간의 응집성을 최대한 제거하였다. 실험에 사용한 나노입자의 질량비는 0.2, 0.5%이다.

나노유체의 밀도, 열전도도, 점도값은 나노입자의 부피비 ϕ 를 사용하여 Williams 등⁽⁷⁾이 제안한 아래 식 (4)~(6)을 이용하여 계산하였다.

$$\rho = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_w \quad (4)$$

$$k = k_w (1 + 4.5503 \phi) \quad (5)$$

$$\mu = \mu_w \exp[4.91 \phi / (0.2092 - \phi)] \quad (6)$$

여기서 ρ , k , μ 는 각각 밀도, 열전도도, 점도를 나타내며, 하첨자 p 는 나노입자, w 는 물을 나타낸다. Zeitoun과 Ali⁽⁸⁾는 위 식들과 측정값을 비교하였는데, 밀도는 거의 일치하고, 열전도도는 식 (5)의 5% 이내, 점도는 식 (6)의 20% 이내에 존재해, 나노유체 물성값을 대략적으로 예측하는 데 큰 오차는 없는 것으로 나타났다. 위 식들에 의해 계산한 물과 나노유체의 물성값은 Table 1에 나

Table 1 Properties of water and nanofluid

	Density (kg/m ³)	Viscosity (Pas)	Thermal Conductivity (W/mK)
Water	998.2	1.00310 ⁻³	0.597
0.2% wt. Nanofluid	999.6	1.01710 ⁻³	0.599
0.5% wt. Nanofluid	1001.8	1.03810 ⁻³	0.601

Table 2 Experimental Conditions

Case	Fluid	Pressure (MPa)	T_f (°C)
1	Water	0.2	11
2		0.3	10
3	0.2% wt. Nanofluid	0.2	13
4		0.3	15
5	0.5% wt. Nanofluid	0.2	20
6		0.3	20

타내었다.

실험 조건은 Table 2에 나타내었다. 분무냉각의 유체를 물, 질량비 0.2% 나노유체, 질량비 0.5% 나노유체를 사용하였고, 유체의 분사압력 P=0.2, 0.3 MPa인 경우에 대해 실험을 수행하였으며, 히터 공급 전압을 증가시켜 가면서 정상상태 도달 후에 열전대의 온도를 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

분사압력과 사용 유체에 따른 고온 벽면에서의 열유속과 열전달계수를 Fig. 3과 4에 나타내었다.

기존의 일반적인 분무냉각 연구결과들과 마찬가지로 분사압력이 0.2 MPa에서 0.3 MPa로 높아짐에 따라 고온 벽면에 분사되는 유체의 질량유량이 증가하기 때문에, 물을 비롯한 두 나노유체에서도 열유속과 열전달계수가 증가하고 있음을 알 수 있다.

또한, Fig. 4의 열전달계수를 보면 온도차 ΔT 가 낮은 경우는 비등열전달은 아직 발생하지 않고 단상에서의 증발에 의한 열전달이라고 볼 수 있으며, 분사압력이 높은 경우가 낮은 경우보다 확실하게 열전달계수가 높게

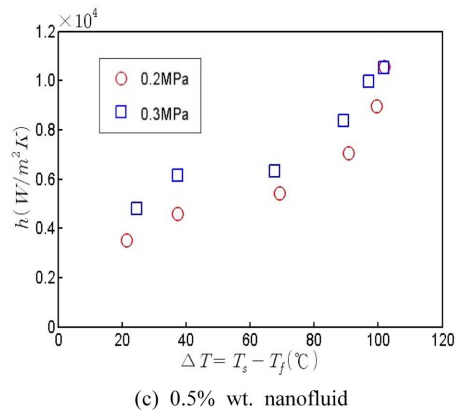
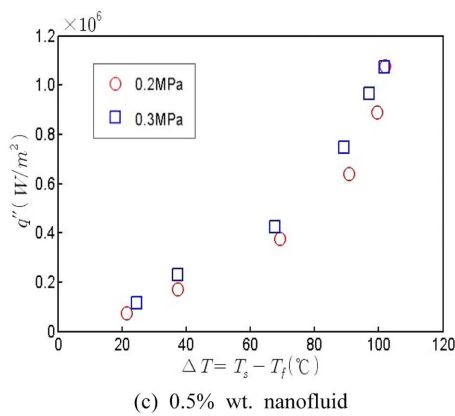
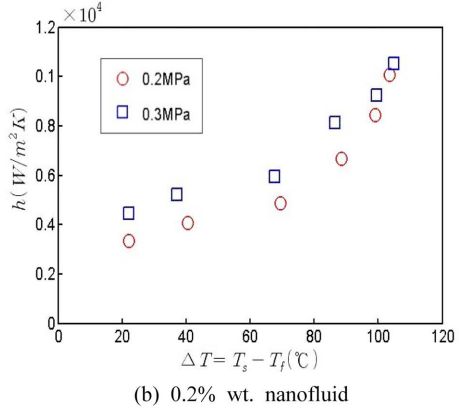
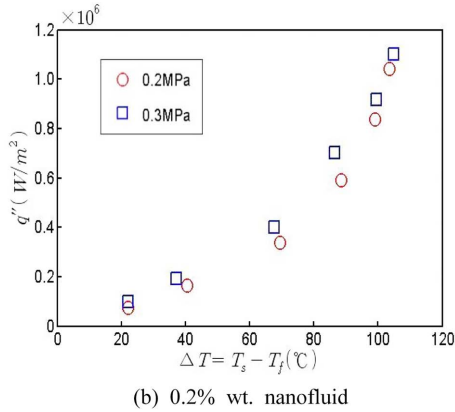
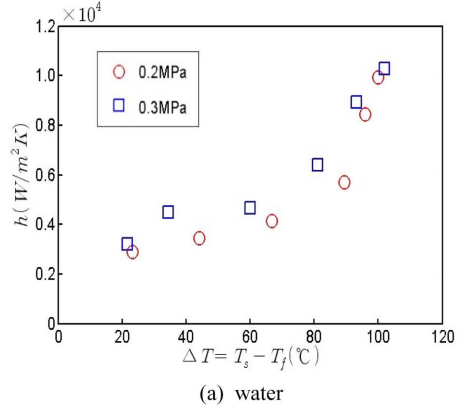
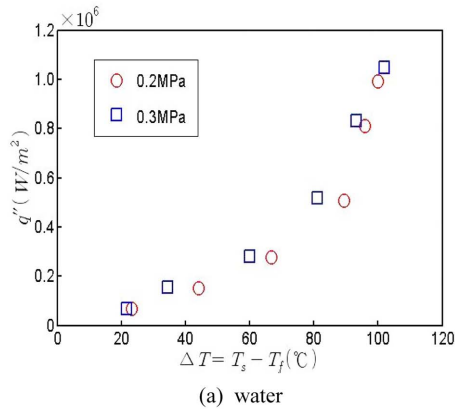


Fig. 3 heat flux with different fluids

Fig. 4 heat transfer coefficient with different fluids

나타나고 있다. 반면에 ΔT 가 100°C를 넘어서게 되면 비등열전달이 시작되는데 분사압력 차이에 의한 열전달계수의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 온도차가 커지며 분사압력 차이로 인한 질량유량 변화의 영향이 감소했음을 의미한다.

나노유체의 분무냉각특성을 물을 사용했을 때의 냉각특성과 비교하기 위하여 Fig. 5는 열유속을 Fig. 6은 열

전달계수를 비교하였다. 전반적으로 물보다는 나노유체의 분무냉각특성이 더 높게 나타났으며, 나노유체의 질량비가 높을수록 분무냉각특성이 더 높게 나타남을 알 수 있다. 또한, 동일한 압력에서 ΔT 가 낮은 단상 열전달 영역에서는 나노유체의 냉각특성이 뚜렷하게 높게 나타났지만, ΔT 가 높아져 비등 영역에 도달하면, 물과 나노유체 사이의 냉각특성 차이가 미미해진다는 것을 알 수

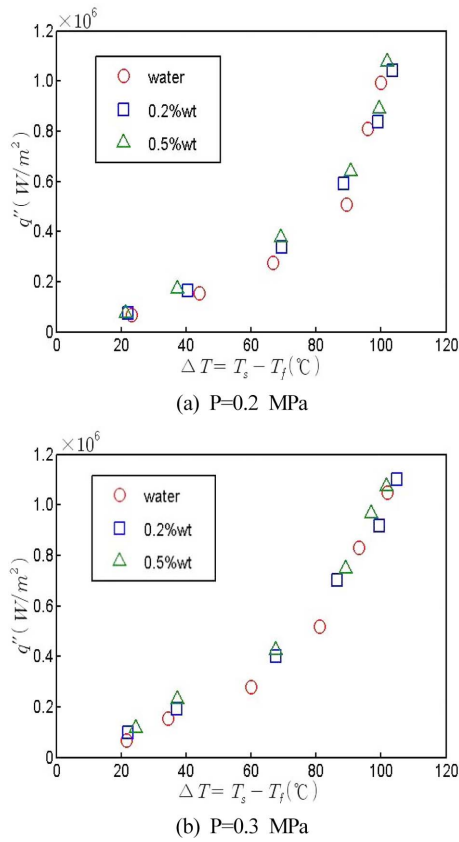


Fig. 5 Comparison of heat flux between water and nanofluids at different pressures

있다.

이러한 경향을 좀더 정량적으로 파악하기 위하여 단상 열전달 영역에 해당하는 온도차 $\Delta T=70^{\circ}\text{C}$ 일 때의 정량적인 열유속, 열전달계수와 이 값들의 물 분무냉각과의 비를 Table 3에 나타내었다. $\Delta T=70^{\circ}\text{C}$ 일 때의 실험값이 없는 경우는 인접한 데이터로부터 근사값을 구하였다.

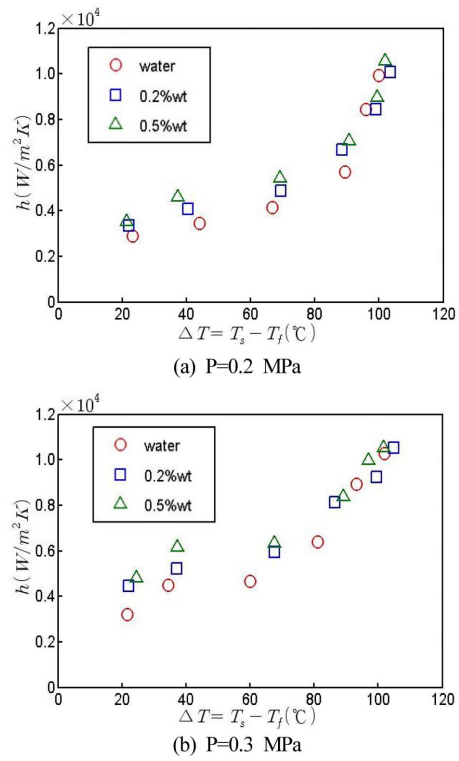


Fig. 6 Comparison of heat transfer coefficient between water and nanofluids at different pressures

이전 그림에서 확인할 수 있었듯이 물에 나노입자를 추가시킨 나노유체의 경우 열유속과 대류열전달계수가 증가함을 알 수 있다. 분사압력 0.2 MPa에서 질량비 0.2%, 0.5% 나노유체의 열전달 계수는 물과 비교했을 때 각각 13%, 26% 증가하였다. 즉, 나노입자의 질량비가 증가할수록 분무냉각특성이 증가하였음을 확인할 수 있다. 분사압력 0.3 MPa에서도 마찬가지로 질량비 0.2%, 0.5% 나노유체의 열전달계수는 물과 비교하여 각

Table 3 Comparison of heat flux and heat transfer coefficient between water and nanofluids at $\Delta T=70^{\circ}\text{C}$

$\Delta T=70^{\circ}\text{C}$		q'' (W/m^2)	Ratio	h ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)	Ratio
P=0.2 MPa	Water	3.1010^5	1	4,366	1
	0.2 % wt. Nanofluid	3.4510^5	1.11	4,918	1.13
	0.5 %wt. Nanofluid	3.8610^5	1.25	5,502	1.26
P=0.3 MPa	Water	3.9310^5	1	5,485	1
	0.2 % wt. Nanofluid	4.4010^5	1.12	6,223	1.14
	0.5 %wt. Nanofluid	4.6310^5	1.18	6,552	1.20

각 14%, 20% 증가하였다.

나노입자가 추가된 나노유체에서 분무냉각특성이 증가한 요인들은 여러 가지가 있을 수 있다. 알루미늄의 열전도도는 33 W/mK로 0.6 W/mK인 물보다 55 배가 높으며 이러한 알루미늄 입자가 포함된 나노유체의 열전도도는 물과 비교하여 약간씩 증가한다. 또한, 분사된 액적 속에 알루미늄 나노입자들이 포함되어 있기 때문에 고온 벽면에서 액적으로서의 열전달이 물만 사용하는 경우보다는 향상될 수 있다.

또한, 나노입자가 추가됨으로써 고온 벽면에 충돌하는 액적의 습윤성(Wettability)이 증가하여, 열전달이 증가했을 수도 있다. 신동환 등⁹⁾은 나노유체 액적의 젖음 거동 및 증발특성을 분석하여, 나노유체의 질량비가 증가할수록 돌레길이가 증가하며 총 증발시간은 감소함을 보고하였다. 김영찬¹⁰⁾은 고체면의 표면조도가 일정한 경우 물보다 나노유체의 접촉각이 작아짐을 보고하였다. 이는 충돌 액적이 고온 벽면과 접촉하는 면적이 더 증가하게 되며, 이로 인하여 고온 벽면으로부터 액적으로서의 열전달도 증가하게 된다.

유체와 벽면 온도차가 높지 않아 단상 대류열전달만으로 고온벽이 냉각되는 경우는 위에 설명한 바와 같이 나노유체를 사용한 경우가 물을 사용한 경우보다 확실하게 열전달이 증가하였지만, Figs. 5와 6에서 알 수 있듯이 유체와 벽면 온도차가 증가하여 비등열전달이 생기게 되면 물과 나노유체에서의 열전달 차이가 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 기존 나노유체를 이용한 비등열전달 실험결과와 경향이 비등열전달이 발생하는 분무냉각에서도 유사하게 나타난다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 나노입자의 질량비와 유체 분사압력을 변화시키며 고온면에서 비등 현상이 발생한 직후까지의 고온면 온도에 대해 정상상태로 분무냉각실험을 수행하여 물과 알루미늄 나노유체의 분무냉각 특성을 비교하였다.

동일한 분사 압력에서 물 분무와 비교했을 때 열전달 계수는 나노입자의 질량비가 0.2%일 때 약 13%, 질량비가 0.5%일 때 약 20~26%까지 증가하였다. 이는 나노유체에 포함된 나노입자에 의한 전도열전달의 증가와 고온 벽면과 충돌하는 나노유체 액적의 습윤성의 증가에 기인한 것으로 예측된다. 비등 영역에서는 나노유체

의 열전달 증가 현상이 확실하지는 않지만, 비등 이하의 단상 열전달 영역에서는 나노유체의 분무냉각특성이 더 높기 때문에, 고온벽의 온도가 그리 높지 않은 전자장치 부품 냉각과 같은 단상 영역 분무냉각 분야에서 나노유체를 활용한다면 냉각 효율이 증가할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) J. H. Kim, "Spray cooling heat transfer: The state of the art", *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, 2007, pp. 753~767.
- (2) Y. Tao, X. Huai, L. Wang and Z. Guo, "Experimental characterization of heat transfer in non-boiling spray cooling with two nozzles," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, 2011, pp. 1790~1797.
- (3) C. D. Martinez, "Heat transfer enhancement of spray cooling with nanofluids," MS Thesis, University of South Florida, 2009.
- (4) D. S. Zhu, J. Y. Sun, S. D. Tu and Z. D. Wang, "Experimental study of non-boiling heat transfer by high flow rate nanofluids spray", *The 6th Int. Symp. on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion*, AIP Conference Proceedings, 2010, pp. 476~482.
- (5) H. Bellerová, M. Pohanka, M. Raudenský, A. A. Tseng, "Spray cooling by Al₂O₃ and TiO₂ nanoparticles in water", *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems 2010*, Las Vegas, NV, 2010.
- (6) T. B. Chang, S. C. Syu, Y. K. Yang, "Effects of particle volume fraction on spray heat transfer performance of Al₂O₃-water nanofluid," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, 2012, pp. 1014~1021.
- (7) W. Williams, J. Buongiorno, L. Hu, "Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids nanofluids in horizontal tubes," *J. of Heat Transfer*, Vol. 130, No. 4, 2008, 042412.
- (8) O. Zeitoun and M. Ali, "Nanofluid impingement jet heat transfer," *Nanoscale Research Letters*, Vol. 7, 2012, 139.
- (9) 신동환, 이성혁, "나노유체 액적의 젖음거동 및 증발 특성", *한국액체미립화학회지*, 제17권 제1호, 2012, pp. 9~13.
- (10) 김영찬, "표면조도가 나노유체 액적의 접촉각에 미치는 영향", *대한기계학회논문집 B권* 제37권 제6호, 2013, pp. 559~566.