

매트릭스합성 분산법에 의해 제조된 다이아몬드 나노유체의 대류열전달 특성

손 권¹ · 이정석² · 박태희³ · 박권하[†]

(원고접수일 : 2012년 7월 27일, 원고수정일 : 2012년 10월 30일, 심사완료일 : 2013년 1월 17일)

Convective heat transfer characteristics of diamond nanofluid produced by matrix synthetic method

Kwun Son¹ · Jung-Seok Lee² · Tae-hee Park³ · Kweon-Ha Park[†]

요약: 지구 온난화 현상과 유가급등에 따른 에너지 부족 현상은 생산된 에너지의 효율적인 사용과 관리 문제를 부각시켰다. 이에 열교환기의 에너지 효율 향상을 위한 새로운 방안이 요구되었고 새로운 작동유체로서 나노유체의 열전달 특성 연구가 필요한 실정이다. 나노유체의 전도열전달특성의 경우 많은 선행연구에서 예측 가능한 패턴을 보이며 증가한 반면, 대류열전달 특성의 경우 특성이 명확하지 않아 추가적인 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 25°C, 50°C의 입구온도 조건에서 레이놀즈수와 나노유체의 vol%를 증가시키며 실험을 수행하였다. 수행 결과 레이놀즈수와 vol%, 입구온도가 증가할수록 대류열전달계수가 향상되었다.

주제어: 다이아몬드 나노유체, 열전달계수, 매트릭스합성 분산법

Abstract: The effective use and management of energy resources has been issued to solve the global warming problem and petroleum price increase. To improve the energy efficiency of a heat exchanger, a new countermeasure is required and the heat transfer research of nano-fluids as a new working fluid is needed. This study was carried out with increasing the Reynolds number and the vol% of nano-fluids in the inlet temperature of 25°C and 50°C. As the result, the higher the entrance temperature is, the higher the convective heat transfer coefficient is.

Keywords: Diamond nanofluid, Heat transfer coefficient, Matrix synthetic method

1. 서 론

지구 온난화 현상과 유가급등에 따른 에너지 부족 현상은 생산된 에너지의 효율적인 사용과 관리의 문제를 부각시켰다. 1차 에너지의 대부분은 각종 열교환기를 통해 순환됨으로 열교환기의 에너지 효율 향상을 위한 새로운 방안이 요구되었다.

이에 자동차와 기존 열교환기에서 냉각 유로를 소형화함으로써 열전달 성능을 향상시켰지만 동일한 순환펌프 용량에서 펌핑 파워의 급증에 의한 한계가 보고되었다[1]. 따라서 펌핑 동력 향상에 의한 열전달 계수 증가효과[2]에서 더 나아가 열전달 유체의 열전도도 향상에 따른 열전달 성능 향상이 요구되었고 이에 물, 오일, 에틸렌글리콜 등과 같

† 교신저자: (606-791) 부산광역시 영도구 태종로 727

한국해양대학교 기계에너지시스템공학부, E-mail: khpark@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4367

1 한국해양대학교 대학원 기계공학과, E-mail: realsonkwun@naver.com, Tel: 051-410-4953

2 (주)네오엔비즈, E-mail: jslee@neoenbiz.com, Tel: 032-684-9749

3 (주)네오엔비즈, E-mail: nanodiamond@neomond.com, Tel: 032-684-9749

은 기존 열전달 유체를 대체할 차세대 열전달 유체로써 나노유체가 주목받고 있다.

나노유체란 기본유체에 100nm 크기 이하의 금속상 혹은 비금속상 입자를 분산, 부유시켜 제작한 유체로서[3], 1999년 최용소 박사팀의 연구[4]에서 기본유체 대비 획기적인 열전도도 상승이 보고된 이후 현재까지 다양한 나노입자를 이용한 나노유체들이 연구되고 있다.

나노유체는 기존의 수 mm 혹은 수 μm 크기의 입자가 첨가된 슬러리 상태 유체의 침전 등의 분산 안정성 문제, 구동부위의 마모·마찰 문제를 극복할 수 있고, 나노입자 제조기술 발달에 따라 대량생산이 가능해 졌으며, 열전도도와 대류열전달 성능 또한 기존의 열전달 유체, 슬러리 상태 유체보다 크게 증가하는 특성을 보인다.

이후 나노유체에 대한 다양한 연구가 수행되었는데, 열전도도의 경우 많은 선행연구를 통해 나노분말 자체의 열전도도, 기본유체의 열전도도가 높을수록 열전도도의 향상 폭이 컸고[5]-[7], 비표면적, 작동온도, 체적분율이 증가할수록 열전도도 향상 폭이 증가하는 경향을 보였다[8]-[12].

또한 탄소나노튜브를 이용한 나노유체 열전도도 연구 결과 탄소나노튜브 자체의 높은 열전도도와 더불어 길고 잘 엉키는 고유의 형상적 특징 역시 열전도도 향상에 영향을 주는 요소임을 알 수 있다[13]-[17].

위와 같이, 나노유체의 열전도도에 대한 선행연구들에서는 열전도도 향상에 영향을 주는 요소들에 대한 열전도도 향상 경향이 예측 가능한 패턴을 보였다[18].

열전도도와 더불어 나노유체의 열전달 성능에 중요한 핵심역할을 하는 열전달계수를 측정하기 위한 대류열전달 특성 연구 또한 많은 선행연구가 이루어졌다.

마찬가지로 나노분말의 크기가 작아질수록, vol%가 증가할수록 열전달 계수가 상승하였지만 열전달계수 상승폭이 연구자에 따라 상이하여 추가적인 연구가 필요한 실정이다[19]-[21].

본 연구에서는 제작이 수월하고 경제적인 이유로 선행 연구들에서 주로 사용된 알루미늄 나노분

말들보다 밀도가 낮고 열전도도가 월등한 다이아몬드 분말[5]을 증류수에 분산시킨 나노유체를 이용하여 증류 영역에서 25 $^{\circ}\text{C}$, 50 $^{\circ}\text{C}$ 의 입구온도 조건으로 각각 0vol%, 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%로 제조된 나노유체의 대류열전달계수를 측정하였다.

2. 실험장치 구성 및 방법

2.1 나노유체 제조 및 분산 안정도

나노유체의 제조는 나노입자들의 분산 후 뭉침 현상이 발생하지 않고, 고른 분산도를 보이며, 가격이 저렴하여 대량생산이 가능한 매트릭스합성 분산법을 이용하여 평균직경이 38nm인 나노다이아몬드 입자를 증류수에 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%로 분산하여 제조하였다.

Figure 1은 나노유체의 분산안정성을 측정할 그래프로서 Formulaction사의 Turbiscan을 이용하여 측정하였다. 측정결과 7일 이상 응집 및 침전현상이 관찰되지 않아 분산 안정도가 매우 우수하다고 판단된다.

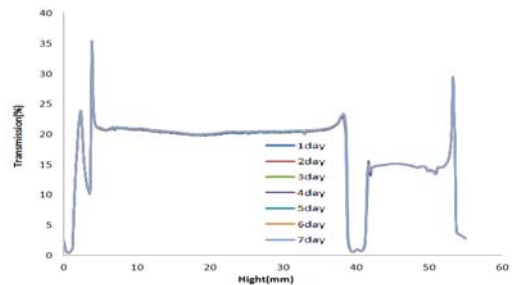


Figure 1: Result of stability test

2.2 실험장치 구성

Figure 2는 관내 대류열전달 특성을 실험하기 위한 장치의 개략도이다. 기어펌프를 이용하여 유체를 순환시키는 폐회로 시스템을 구성하였고, 압력용기를 이용하여 회로 내부의 공기를 제거하였다. 실험영역은 내경 1.75mm의 스테인레스 관을 사용하였으며, 균일 열유속 가열 조건을 위해 직류 전원 공급장치로 관에 직접 전기를 인가하여 줄열에 의한 관 벽면으로부터 유체로의 열전달이

일어나게 하였다. 실험영역 내부의 레이놀즈수는 직접 측정된 나노유체의 점도를 기준으로 하여 계산된 차압을 기준으로 하여 계산된다. 또한 외부로의 열손실을 차단하기 위해 관 주위를 외경 11cm 두께의 세라믹 계열 단열재로 감쌌고, 그 외의 연결배관 또한 외경 7cm이상의 단열을 함으로써 유체 이송간 열손실을 최소화하였다.

본 실험 장치는 항온조를 통과하며 실험조건 온도(25℃, 50℃)로 제어된 나노유체를 기어펌프를 이용하여 순환시킨다. 실험영역 입구에서 관 내부에 삽입된 온도계에 의해 입구 온도가 측정되며, 28W의 열량이 가해진 실험영역을 지나며 나노유체는 열을 공급받는다. 입구 2cm지점에서 16cm간격으로 부착되어 있는 열전대에 의해 대류열전달계수를 구하기 위한 관 표면 온도가 측정되며, 압력강하는 실험영역과 동일 길이의 별도의 관에서 측정되고, 다시 항온조를 거쳐 실험조건 온도로 제어된다.

압력강하는 ±0.25%의 정확성을 가진 JANITOR사의 차압계를 사용하였다. 기어펌프는 유량을 30~300cc/min으로 조절가능한 Tuthill사의 D-Series를 사용하였고, 인버터를 이용하여 유량을 조절하였다. T-Type온도계와 열전대는 OMEGA사의 제품을 사용하였다. 점도는 Cannon사의 I50 586A를 사용하여 측정하였다.

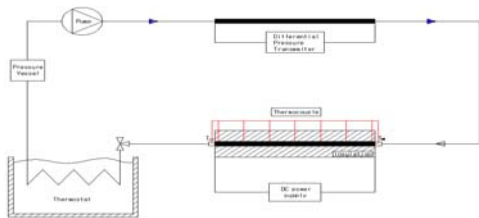


Figure 2: Schematic of experimental system

2.3 실험결과 처리

각 실험조건에서의 원형관내 대류 열전달 계수는 식 (1)에 의해 구해진다[1].

$$h(x) = \frac{q_s''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad (1)$$

여기서 $T_s(x)$, $T_m(x)$, q_s'' , $h(x)$ 는 각각 관 표면온도, 유체 평균 온도, 열유속, 대류 열전달 계수이다.

원형 관내 유체의 열적입구길이는 식 (2)에 의해 구해진다[1].

$$x_t = 0.05 \cdot Re \cdot Pr \cdot D_i \quad (2)$$

여기서 x_t , Re , Pr , D_i 는 각각 열적입구길이, 레이놀즈수, 프란틀수, 관 내경이다.

구간별 원형 관내 유체의 평균온도는 일정 열유속 조건 하에서 에너지 평형을 적용해서 식 (3)를 통해 구하였다[1].

$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{q_s'' \pi D_o}{\dot{m} C_p} x \quad (3)$$

여기서 $T_{m,i}$, D_o , \dot{m} , C_p 는 각각 유체 입구 온도, 관 외경, 질량 유량, 비열이다.

원형 관내 유체의 압력강하는 완전발달된 층류 유동에 대하여 식 (4)을 이용하여 구할 수 있다 [1].

$$\Delta P = 32 \frac{VL\mu}{D_i^2} \quad (4)$$

여기서 ΔP , V , L , μ , D_i 는 각각 관 내부에서의 압력강하, 관 내부의 유속, 관의 길이, 유체의 점성계수, 원형관의 내경이다.

2.4 장치 신뢰성 검증

Figure 3는 실험영역에서의 관 표면 온도와 구간별 원형 관내 유체의 평균온도의 변화를 나타낸다. 전구간에서 온도가 증가하는 경향을 보이며 이는 실험영역이 일정 열유속 조건 하에 있음을 나타낸다.

Figure 4는 기본유체인 증류수를 이용하여 실험적으로 구한 Nusselt number와 이론값을 나타낸다. 실험값과 이론값이 5% 이내의 오차를 보이므로 실험을 수행하는데 있어 충분한 신뢰성을 가진다고 사료된다.

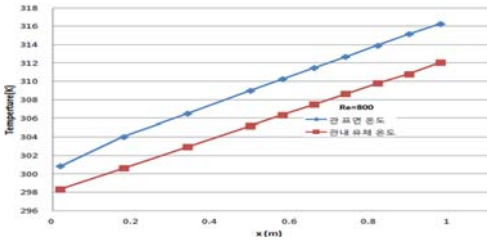


Figure 3: Surface temperature and bulk mean temperature of DI water flowing through test section with constant heat flux

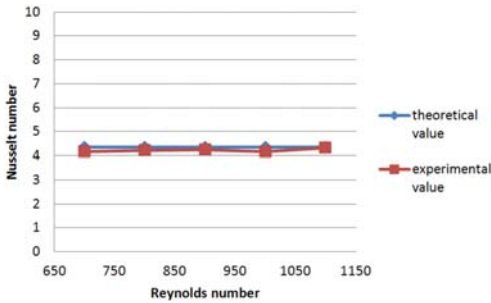


Figure 4: Comparison between theoretical value and experimental value of DI water

3. 실험결과 및 고찰

3.1 다이아몬드 나노유체의 대류열전달 특성

Figure 5과 Figure 6는 레이놀즈수 1300에서 입구온도가 각각 25℃, 50℃일 때의 다이아몬드 나노유체의 대류열전달계수 변화를 나타낸다. 입구온도 25℃일 때 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%의 나노유체의 대류열전달계수는 기본유체 대비 약 3%, 20%, 27% 향상되었고, 입구온도 50℃일 경우 역시 기본유체 대비 약 2%, 24%, 32% 향상되었는데, 특히 나노유체의 농도가 0.1vol%에서 0.3vol%로 증가 시에 큰 폭의 대류열전달계수 향상을 보였다. 또한 두 경우 모두 입구영역에 해당되는 실험영역의 시작부에서 각각 27.6%, 37.8%의 가장 높은 대류열전달계수 향상폭을 보이고 유동이 진행됨에 따라 일정한 대류열전달계수값을 나타내지 않고 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 레이놀즈수 1300에서 입구온도 25℃, 50℃일 때 각각

0.7m, 0.404m의 긴 열적 입구영역 길이에 의한 영향으로 사료되며, 이는 선행연구들에서 나노유체의 대류열전달 특성 향상 기구로 제시된 유체 내 나노입자들의 브라운 운동에 기인한 열경계층 교란작용에 따르는 열전달 향상 효과와도 잘 일치하는 결과이다.

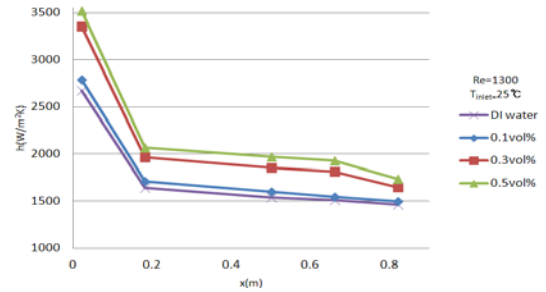


Figure 5: Convective heat transfer coefficient at Re=1300, inlet temperature=25℃

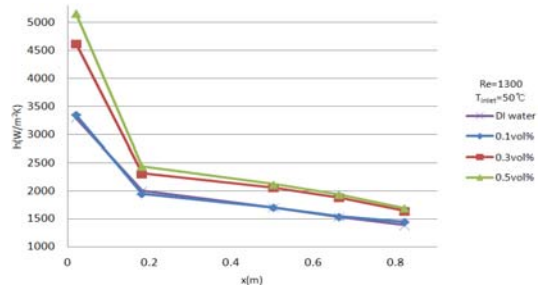


Figure 6: Convective heat transfer coefficient at Re=1300, inlet temperature=50℃

Figure 7과 Figure 8은 입구온도가 각각 25℃, 50℃ 조건에서 레이놀즈수 증가에 따른 대류열전달 계수를 나타낸다. 대류열전달계수는 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 열전대 부착지점들의 국소대류열전달계수를 구하고 그 값을 전체 실험영역에 대한 평균으로 구하였다. 입구온도 25℃일 때 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%의 나노유체의 대류열전달계수는 기본유체 대비 약 4%, 23%, 28% 향상되었고, 입구온도 50℃일 경우는 각각 3%, 28%, 33% 향상되었다. 두 경우 모두 레이놀즈수의 증가에 따라 대류열전달계수가 향상되는 경향을 보였고, 나노입자의 농도가 0.1vol%에서 0.3vol%로 증

가할 때 20~25%의 가장 큰 향상폭을 보였다. 또한 입구온도가 25℃에서 50℃로 증가함에 따라 나노유체의 기본유체 대비 대류열전달계수의 향상폭은 0.1vol%에서 큰 변화가 없었지만 0.3vol%, 0.5vol%의 경우 각각 5%, 6%의 향상폭 증가를 보였는데, 이는 나노유체의 작동온도상승에 따른 열전도도 상승의 영향으로 사료된다.

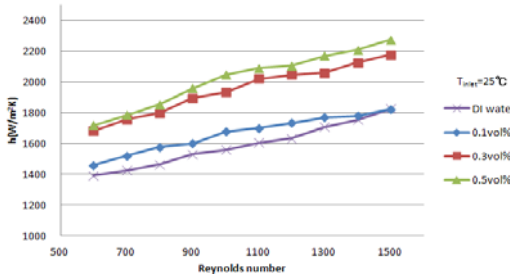


Figure 7: Convective heat transfer coefficient at inlet temperature of 25°C

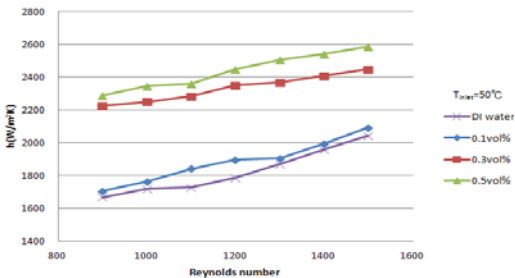


Figure 8: Convective heat transfer coefficient at inlet temperature of 50°C

4. 결 론

본 연구에서는 증류수를 기본유체로 매트릭스합성 분산법에 의해 제조된 다이아몬드 나노유체의 대류열전달 특성을 입구온도 25℃, 50℃ 조건에서 각각 부피비 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%의 조건으로 레이놀즈수를 변화시키며 실험적으로 연구하였고 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 입구영역에서의 대류열전달계수는 실험영역의 시작부에서 각각 27.6%, 37.8%의 가장 높은 향상폭을 보이고 점차 줄어드는 경향을 보였다.

2) 다이아몬드 나노유체의 대류열전달계수는 레

이놀즈수의 증가에 따라 대류열전달계수가 향상되는 경향을 보였는데, 입구온도가 25℃이고 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%의 부피비에서 증류수 대비 약 4%, 23%, 28%, 동일 조건에서 입구온도가 50℃인 경우 각각 3%, 28%, 33% 향상되었고 특히 0.3vol%에서 0.5vol%로 증가시 향상폭이 두드러졌다.

3) 대류열전달계수 향상폭은 입구온도 50℃인 경우 0.3vol%, 0.5vol%에서 입구온도 25℃인 경우에 비해 각각 5%, 6%의 향상폭 증가를 보였다.

이상의 결과에서 다이아몬드 나노유체는 열교환 유체로서 증류수에 비해 큰 장점을 가질 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 소관 미래해양산업기술개발사업(2012)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] M. S. Lyu, "Vehicle fuel economy improvement by studies on the engine cooling and ancillaries system of the heavy duty engine," Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, vol. 15, no. 3, pp. 79-84, 2007.
- [2] S. U. S. Choi, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, Fluid Engineering Division vol. 231/ Material Division, vol. 66, P. 99, 1995.
- [3] J. A. Easterman, S. U. S. Choi, S. Li, and L. J. Thompson, "Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids," Symposium proceedings, Nanophase and Nanocomposite Mater. II, vol. 457, pp. 2-11. 1997.
- [4] S. U. S. Choi, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in developments applications of non newtonian flows." D. A. Singer, and H. P. Wang, American Society or Mechanical Engineers, New York, Fluid Engineering Division vol. 231, Material

Division, vol 66, pp. 99-105. 1995.

- [5] S. Lee, S. U. S Choi, S. Li, and J. A Esterman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles", *Journal of Heat Transfer* 121, pp. 280-289. 1999.
- [6] K. -H. Park, J. -A. Lee, and H. -M Kim, "Heat conductivity test and conduction mechanism of nanofluid", *Journal of the Korean Society of Maritime Engineering*, vol. 32, no. 6, pp. 862-868, 2008 (in Korean).
- [7] H. Xie, J. Wang, T. Xi, F. Ai, and Q. Wu, "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles", *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 7, pp. 4568-4572, 2002.
- [8] J. A. Esterman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, L, and J. Thompson, "Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycole-based nanofluids containing copper nanoparticles", *Applied Physics Letters*, vol. 78, no. 6, pp. 718-720. 2001.
- [9] S. -W. Kang, C. -H. Lee, and S. -H. Kim, "Effect of nanofluid on heat transfer in double-pipe heat exchanger system", *Journal of the Korea Society for Energy Engineering*, pp. 159-164, 2004 (in Korean).
- [10] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids", *Journal of Heat Transfer*, vol. 125, pp. 567-574, 2003.
- [11] C. H. Li and G. P. Peterson, "Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids)", *Journal of Applied Physics*, vol. 99, pp. 084314-1~084314-8, 2006.
- [12] C. H. Chon and K. D. Kihm, "Thermal conductivity enhancement of nanofluids by Brownian motion", *Journal of Heat Transfer*, vol. 127, p. 810, 2005.
- [13] S. U. S Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood, and E. A. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions", *Applied Physical Letters*, vol. 79, pp. 2252-2254, 2001.
- [14] H. Xie, H. Lee, W. Youn, and M. Choi, "Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities", *Journal of Applied Physics*, vol. 94, pp. 4967-4971, 2003.
- [15] M. Biercuk, M. Llaguno, J. Hyun, M. Radosavljevic, A. Johnson, and J. Fischer, "Carbon nanotube composites for thermal management", *Applied Physical Letters*, vol. 80, pp. 2767-2769, 2002.
- [16] D. Wen and Y. Ding, "Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids)", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 18, no. 4, pp. 481-485, 2004.
- [17] M.-S. Liu, M. Ching-Cheng Lin, I. T. Huang, and C. -C. Wang, "Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids", *International Communications in Heat Transfer*, vol. 32, no. 9, pp. 1202-1210, 2005.
- [18] W. yu, D. M. France, J. L. Routbort, and S. U. S Choi, "Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements", *Heat Transfer Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 432-460, 2008.
- [19] X. Q. Wang and A. S. Mujumdar, "Heat transfer characteristics of nanofluids : a review" *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pp. 1-19. 2007.
- [20] S. M. S. Murshed, K. C. Leong, and C. Yang, "Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids - A critical review", *Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 2109-2125, 2008.
- [21] M. Hojjat, S. Gh. Etemad, R. Bagheri, and

J. Thibault, "Laminar convective heat transfer of non-Newtonian nanofluids with constant wall temperture", Heat Mass Transfer, vol. 47, pp. 203~209, 2011.

[22] Frank P. Incropera and David P. DeWitt, Introduction to Heat Transfer 5th Eds, John Wiley & Sons, New York, 2002.