

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.4.235

## 나노유체 토로이달 자연대류 루프에서의 열전달 특성

장주찬\* · 이석호<sup>†</sup> · 이충구\*\*

(2008년 5월 26일 접수, 2009년 3월 11일 수정, 2009년 3월 23일 심사완료)

### Heat Transfer Characteristics on Toroidal Convection Loop with Nanofluids

Ju-Chan Jang, Seok-Ho Rhi and Chung-Gu Lee

**Key Words:** Toroidal Loop(토로이달 루프), Heat Transfer(열전달), Nanofluid(나노유체)

#### Abstract

Experimental studies on single-phase toroidal circulation loop(thermosyphon) have been performed in the present study with Ag-nanofluids as a working fluids. The present paper deals with an experimental study on the heat transfer behavior of single-phase toroidal loop. Toroidal loop charged with nanofluid has been constructed and a number of tests have been carried out. Different geometric parameter, e.g., orientation has been investigated. The tests were conducted employing two fluids: distilled water and Ag-nanofluid of various volume concentrations. The experiments at Rayleigh number from  $10^5$  to  $10^6$  showed a systematic and slight deterioration in natural convective heat transfer. It was observed that the deterioration due to the particle concentration was in the range of 5-10%. At a given particle concentration of 0.05%, abrupt decrease in the Nusselt number and the Raleigh number was observed. The present study with toroidal loop shows that the application of nanofluids for heat transfer intensification should not be decided only by the effective thermal conductivity with increasing particle concentration.

#### 기호설명

$g$  : 중력가속도 [ $m/s^2$ ]

$G$  : 질량유량 [ $kg/m^2 \cdot s$ ]

$h$  : 열전달계수 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$k$  : 열전도계수 [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]

$Nu$ : Nusselt 수

$p$  : 압력 [Pa]

$Q$  : 열전달량 [W]

$r$  : 루프 관 반경 [m]

$R$  : 루프 원형 반경 [m]

$Ra$  : Rayleigh 수

$Re$  : Reynolds 수

$T$  : 온도 [ $^\circ C$ ]

$u$  : 속도 [m/s]

$\beta$  : 열팽창계수 [ $K^{-1}$ ]

$\theta$  : 토로이달루프의 경사각

(a base line = z-axis) [degree]

$\phi$  : 토로이달루프의 경사각

(a base line = x-axis) [degree]

$\rho$  : 밀도 [ $kg/s$ ]

$\mu$  : 점성계수 [ $kg/m \cdot s$ ]

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : rhi@chungbuk.ac.kr

TEL : (043) 261-2444 FAX : (043)263-2441

\* 충북대학교 대학원 기계공학부

\*\* 충북대학교 기계공학부

하첨자

- $eff$  : 유효열전도계수
- $f$  : 유체
- $nano$  : 나노입자
- $p$  : 입자
- $w$  : 벽

1. 서론

토로이달 루프에서의 자연대류현상은 수십년간 태양열 시스템, 원자력발전소, 지열 등 다양한 분야에서 연구 되어 왔다. 이렇게 다양한 분야에서 연구 되는 큰 이유는 시스템에서의 비선형적인 유체 유동 때문이다. 즉 Lorenz 이론으로 설명되는 전형적인 비선형 유동 양식을 따른다. 루프를 따라 유동하는 유체는 수직 또는 수평적으로 다양한 장소에 위치하게 되며, 유체의 유동 힘은 아래쪽을 가열하고 위쪽을 냉각하면서 생기는 수직적이지 않은 온도 및 경사도에 의한 부력에 의해 나타난다. 단순한 구조이지만 유체의 움직임과 동적 성질은 공식화되지 않은 형태로 매우 복잡하게 변화한다.<sup>(1~5)</sup>

토로이달에 관한 연구는 Keller,<sup>(1)</sup> Welander<sup>(2)</sup>와 Greif<sup>(3)</sup>에 의해 연구되었다. Creveling<sup>(4,5)</sup>은 실험에서 무질서하게 계속해서 방향을 전환하는 불규칙한 유동을 처음으로 관찰 하였다. 아랫부분 절반은 일정한 열 유속으로 가열되고 윗부분 절반은 일정한 온도로 냉각된다. Zvirin<sup>(6-8)</sup>은 토로이달 루프에서의 유동불안정에 대하여 이론적으로 다양한 접근을 시도하였으며, Torrance<sup>(9)</sup>는 토로이달 루프를 지열에 이용할 수 있는 가능성을 연구하였다.

나노유체에 대한 연구는 아직까지 뚜렷한 이론적 성과는 없으나 지속적으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 본 연구에서와 같은 자연대류에서의 대한 열전달 특성에 대한 연구는 Wen<sup>(10)</sup>의 디스크판에서는 높은 열전달성능을 보인 반면, Putra 등<sup>(11)</sup>의 경우처럼 오히려 성능저하를 가져오는 경우도 있었다.

토로이달 루프는 원자력발전소의 긴급 냉각시스템으로 사용되며, 에너지 및 히트펌프, 태양열, 및 화학시스템등에서 기계적 부품없이 자연 순환이 가능한 장점 때문에 널리 사용되고 있다.<sup>(6-13)</sup> 본 연구에서 이러한 토로이달 루프의 장점과 유용성을

향상시키기 위하여 나노유체의 열전도도 증가 특성을 이용한 루프의 열전달 성능 향상 혹은 유용성을 파악 하고자 하였으며, 이를 위하여 토로이달 루프의 정상상태 작동특성과 작동유체로서 나노유체를 사용 시 열전달 특성을 관찰하고자 했다. 실험에 사용되는 루프 시스템은 설치하기 좋은 전체적 고유 성질과 높은 열전도성을 가지는 구리로 만들어지며, 내부의 나노유체 작동특성을 파악하기 위하여 다양한 농도의 은 나노유체를 사용하였다.

2. 실험장치 및 데이터 수집

Fig. 2는 토로이달 루프에서의 자연대류 열전달 현상을 연구하기 위해 제작된 실험장치 개략도이다. 원형을 아래와 위로 절반씩 나누어 아래쪽은 가열을 하고 위쪽은 물 재킷의 방식으로 항온기로부터 공급되는 일정한 온도의 냉각수로 냉각하는 구조임을 확인할 수 있다.

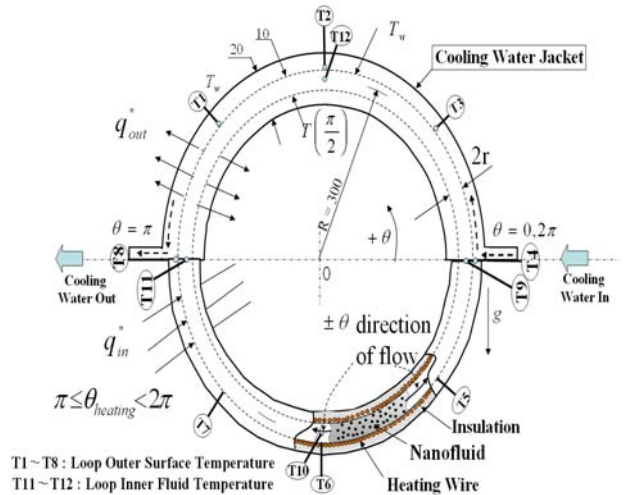


Fig. 1 Schematic drawing of toroidal loop

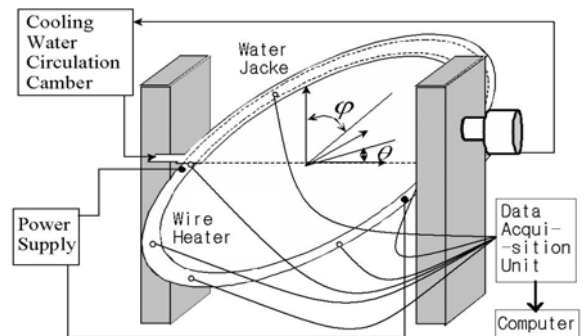


Fig. 2 Toroidal loop thermosyphon setup

물 재킷은 지름이 20mm인 구리관으로 만들어졌다. 차가운 냉각수는 루프의 위쪽 관에서의 벽면온도  $T_w$ 가 항상 일정하게 유지되도록 항온기(Hanbaek Scientific의 Low Temp. Circulator HB-205WL-2)에 의해 0.25l/s로 공급되고 있다.

아래쪽 절반은 직류 전원장치에 연결된 와이어 히터를 감아서 일정한 전력으로 가열된다. 가열부 바깥쪽은 대략 5mm 두께의 여러 겹의 유리 섬유와 단열 테이프로 덮여 있다.

각 부분의 온도는 K-type 열전대로 측정되었다. 온도 측정을 위하여 루프에 총 12지점을 측정하였는데 열전대 1~3번은 냉각부의 벽면, 5~7번은 가열부의 벽면, 4,8번은 단열부의 벽면, 9~12는 토로이달 내부의 작동유체의 온도를 나타낸다. 토로이달 벽면 부분 및 내부의 물 온도의 변화를 Yokogawa의 MX100 데이터 수집장치(Data Acquisition Unit)를 이용하여 기록하였다.

각각의 실험에서 입력된 열량은 50W, 100W, 200W, 그리고 300W로 공급하였다. 또한 Fig. 2에서 보여지는 것처럼  $\theta$  방향으로 30°씩 증가시켜 0°에서 90°까지,  $\phi$  방향으로 30°씩 증가시켜 0°에서 60°까지 토로이달 루프에 작용하는 중력의 방향을 변경하여 실험을 진행 하였다.

실험에 사용된 유체는 은-나노유체 (Ag-H<sub>2</sub>O)로서 50 nm 정도의 은 나노 입자를 증류수에 섞어 만든 은 나노 유체이다. 또한 나노 유체에 희석된 입자의 농도는 0%(증류수), 0.001%, 0.005%, 0.01%, 0.05%, 그리고 0.1% 나노유체를 사용한 후 루프 내부를 세척하고 난 후의 0%(증류수) 순서로 진행하였다.

본 실험적 연구에서 결과의 도출은 온도와 공급 열량이며, 본 실험에 사용된 K-Type 열전대는 자체 오차가  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 이며, 공급 열량에 대한 전압과 전류의 오차는 전류가 실험오차는  $\pm 0.1\%$ , 전압이  $\pm 0.1\%$ 의 범위의 오차를 가지고 있어 공급 열량과 분석상의 열전달계수 등은  $\pm 0.1\%$  이내의 오차를 보였다.

토로이달 루프의 실험결과 해석은 Creveling<sup>(4,5)</sup>이 다양한 경계조건에 대하여 이론과 실험을 통하여 연구를 수행하였으며, 본 연구에서는 Fig. 1에 보이는 것처럼 실험 결과의 분석 및 특성연구를 위하여 실험 결과의 분석 및 해석을 위한 장치 및 모델을 설정하였다. 정상상태의 해석을 작동유체를 물과 나노유체를 사용하였다. 토로이달

루프에서의 실험결과 도출을 위하여 냉각부는  $0 \leq \theta < \pi$  이고, 냉각부의  $T_w$ 는 일정하며, 가열부는  $\pi \leq \theta < 2\pi$  이고  $q_{in}''$ 는 일정하며, 본 연구의 실험결과를 바탕으로 나노유체의 물성치 값을 이용하여  $Nu$ 와  $Ra$  수를 도출하였다.

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TD^3\mu_c}{\nu^2 k_{eff}} \quad (1)$$

$$Nu = \frac{hD}{k_{eff}} \quad (2)$$

실험 결과의 분석을 위해서는 나노유체의 전도도, 비열, 밀도, 점성계수 등의 물성치값들의 계산이 필요하였으며, 본 모델링에서의 전도도에 대한 물성치는 최근 개발된 Bruggeman<sup>(14)</sup> 식으로 표현된다.

$$k_{eff} = \frac{1}{4}[(3\alpha - 1)k_p + (2 - 3\alpha)k_f] + \frac{k_f}{4}\sqrt{\Delta}$$

$$\Delta = \left[ (3\alpha - 1)^2 \left( \frac{k_p}{k_f} \right)^2 + (2 - 3\alpha)^2 + 2(2 + 9\alpha + 9\alpha^2) \left( \frac{k_p}{k_f} \right) \right] \quad (3)$$

또한, 부피비가 1% 미만의 나노입자를 첨가하기 때문에 점성계수에는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 예상하나 Einstein 모델을 가지고 평가하였다.<sup>(15)</sup>

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + 2.5\alpha \quad (4)$$

나노유체의 비열<sup>(16-18)</sup>

$$C_{p,eff} = C_{p,f}(1 - \alpha) + C_{p,nano} \alpha \quad (5)$$

나노유체의 밀도<sup>(16-18)</sup>

$$\rho_{eff} = \rho_f(1 - \alpha) + \rho_{nano} \alpha \quad (6)$$

### 3. 결과 및 고찰

본 실험결과는 토로이달 루프에서의 자연대류에 따른 작동유체들의 정상상태 온도변화 및 나노유체를 사용 시의 특성변화를 관찰하고자 실험 및 분석을 수행하였으며, 본 실험결과는 토로이달 루프에서의 자연대류에 따른 작동유체의 정상상태 온도변화 및 나노유체를 사용시의 특성변화

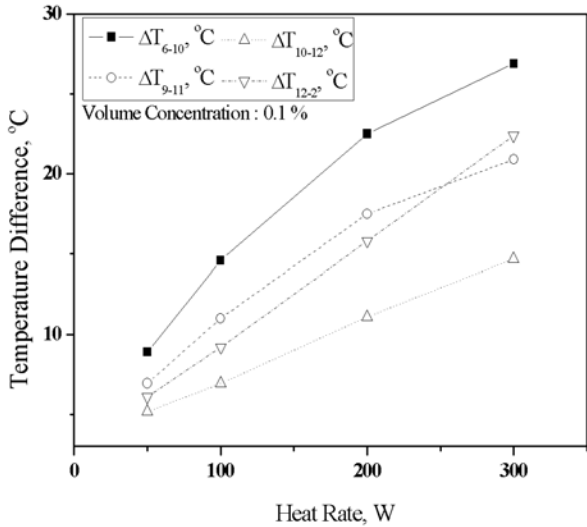


Fig. 3 Effect of heat transfer rate on temperature difference with various positions

를 관찰하고자 실험 및 분석을 수행하였으며, Fig. 3과 4는  $\theta$ 와  $\phi$ 를  $0^\circ$ 로 고정하고 루프내에서의 온도 변화를 나노유체 농도의 증감에 따른 변화를 알아보려고 다양한 위치에서의 온도 차이를 가지고 정리하였다. Fig. 3은 나노입자의 농도를 고정하고 각 위치에서의 온도차를 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 공급 열량의 증가는 온도차의 증가하는 경향을 보여 주었으며,  $\Delta T_{6-10}$ 과  $\Delta T_{12-2}$ 는 가열부와 냉각부의 외부 벽과 유체 사이의 온도차이며, 그림에서 볼 수 있듯이 공급열량이 증가할수록, 각 지점에서의 온도차도 함께 증가하고 있으며, 그림에서 볼 수 있듯이 가열부 출구와 입구에서의 온도차인  $\Delta T_{9-11}$ 가 300W에서 감소하는 것으로 관찰 되었으며, 이는 열전달 효과가 감소하는 것으로 판단되었다.

Fig. 4는 공급열량을 200W로 고정하고 나노유체의 농도에 따른 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 나노유체를 토로이달 루프에서 작동유체로 사용시 각 지점에서의 온도차의 변화는 큰 변화가 없었다. 각 지점의 온도가 농도가 증가함에 따라 극히 미약하나마 상승하는 것으로 관찰 되었다. 이는 나노유체의 사용한 루프에서의 자연대류 열전달 향상에 큰 기여를 못하는 것으로 알 수 있었으나, 가열부 중간부와 냉각부와 중간부 사이의 온도차( $\Delta T_{10-12}$ )를 나노유체 농

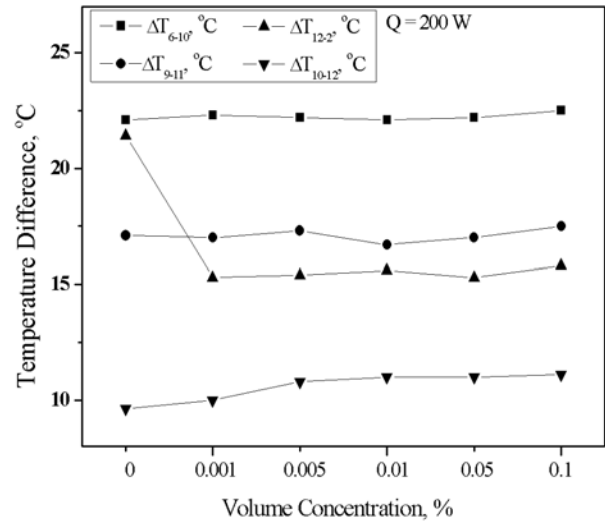


Fig. 4 Effect of heat transfer rate on temperature difference with various positions

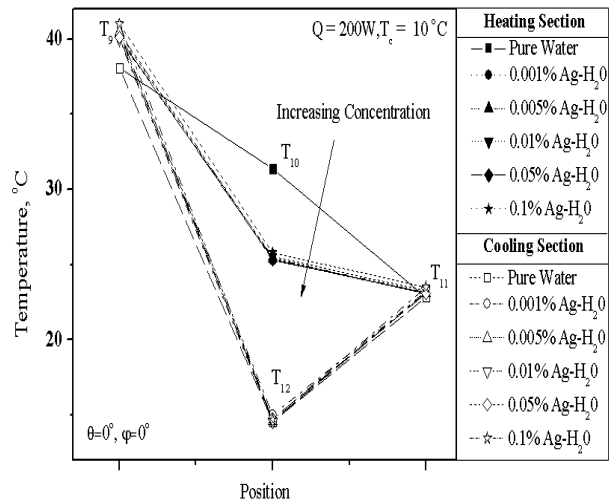


Fig. 5 Effect of nanofluids on loop inner temperatures

도에 따라 비교하면 물과 0.001%의 나노유체를 사용시 급격한 변화가 감지되었으며, 냉각부에서 물 사용시 보다는 냉각 성능에 영향을 미치는 것으로 관찰되었다.

Fig. 5는 나노유체의 농도에 따라서  $T_9$ ,  $T_{10}$ ,  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ 의 토로이달 루프 내부에 삽입한 열전대를 통한 내부 유체의 온도를 직접 관찰한 것이다. 토로이달 루프에서 유체의 유동 방향은 반시계방향으로  $T_9$ 에서  $T_{12}$ 를 거쳐  $T_{11}$ 까지 이동하는 경로로 냉각부의 온도 변화를 알 수 있으며,  $T_{11}$ 에서  $T_{10}$ 을 거쳐  $T_9$ 까지 이동하면서 가열부의 온

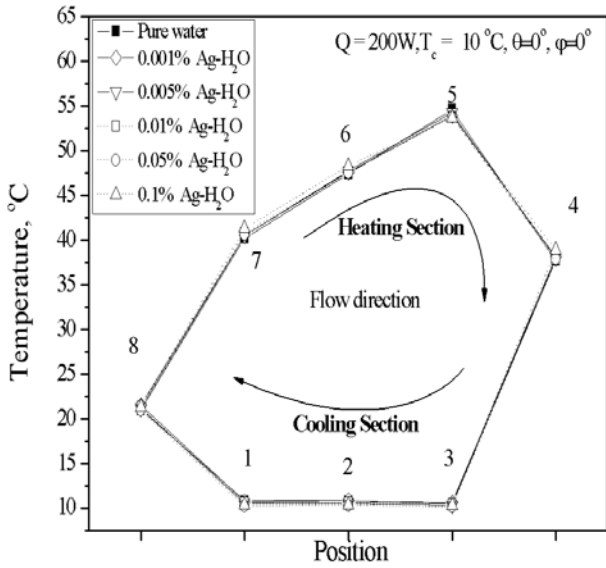


Fig. 6 Effect of nanofluids,  $\Theta = 0^\circ$ ,  $\Phi = 0^\circ$

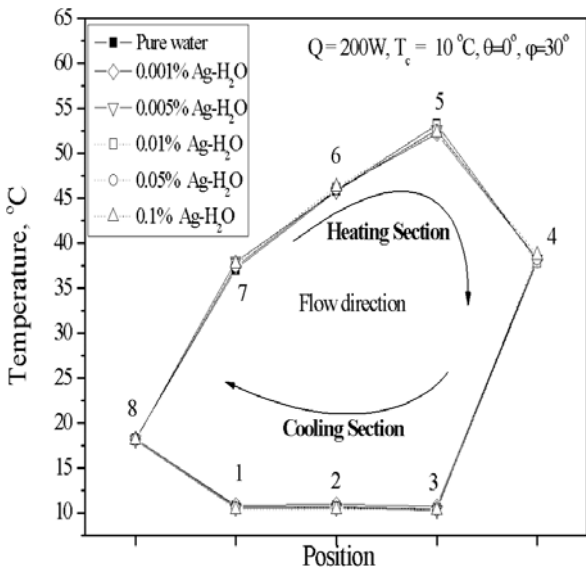


Fig. 7 Effect of nanofluids,  $\Theta=0^\circ$ ,  $\Phi=30^\circ$

도 변화를 파악할 수 있다. 결과에서 보듯이 냉각부에서는 큰 차이가 없었지만 가열부에서는 증류수의 경우가 가열부 중앙인  $T_{10}$ 에서 나노유체에 비해 가장 높은 것으로 보아 보다 많은 열을 흡수한 결과이므로 나노 유체의 농도의 증가와 함께  $T_{10}$ 의 변화와 함께  $\Delta T_{10-12}$ 의 감소로 열전달 성능에 다소 향상을 가져옴을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 나노유체의 농도에 따라서 토로이달 루프에서 온도 수렴 후 각 열전대의 온도의 평균값을 그래프로 비교해본 것이다. 루프에

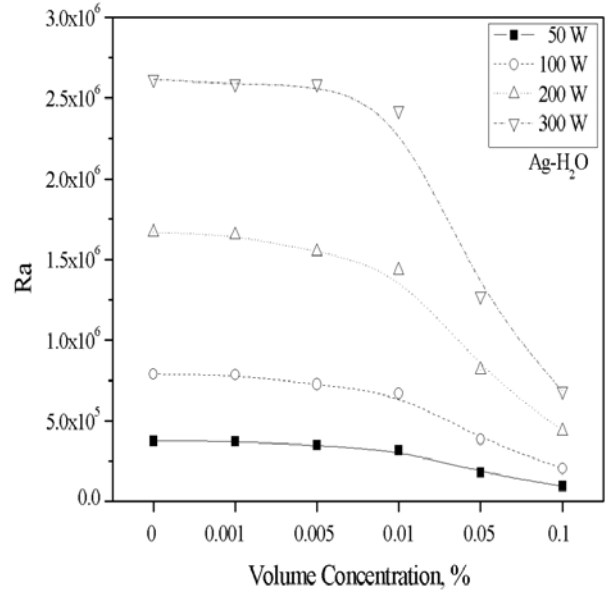


Fig. 8 Effect of particle volume concentration on Ra with Q

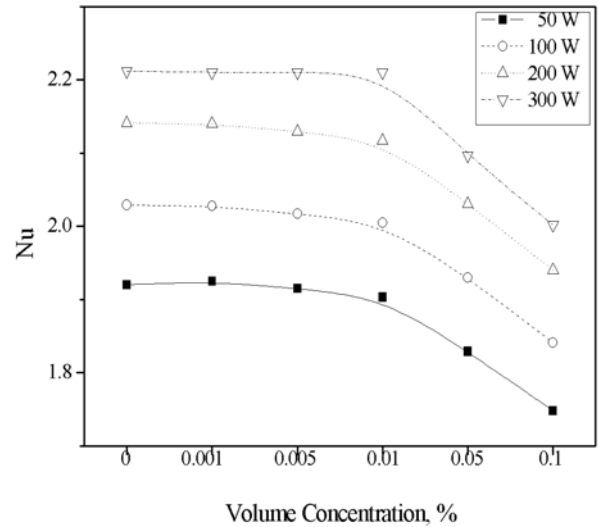


Fig. 9 Effect of particle volume concentration on Nu with Q

서의 유동 방향은 반시계 방향이므로 그래프의 표현에서는  $T_8$ 에서  $T_7$ ,  $T_6$ 을 거쳐  $T_4$ 까지 가열부의 온도 변화와  $T_4$ 에서  $T_3$ ,  $T_2$ 를 지나  $T_8$ 까지 냉각부의 온도 변화를 한눈에 볼 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 나노유체의 농도가 변화해도 각 위치의 토로이달 표면의 큰 온도 변화는 없었다. Fig. 8-10은 나노유체의 물성을 이용하여 실험 온도값에 대한 무차원수 값에 대한 결과를 분석한 것이다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 나노유체의

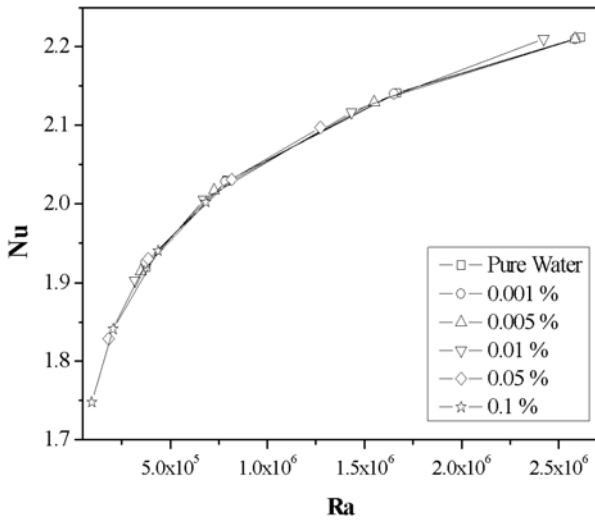


Fig. 10 Effect of Ra with different particle volume concentrations

농도가 증가함에 따라 Ra수의 감소하는 것으로 알 수 있으며, 이는 나노유체의 농도가 원형 루프 자연 대류 시스템에서 입자의 농도증가가 열전달 성능을 저하시키는 것으로 알 수 있으며, 공급 열유량이 증가할수록 열전달 성능의 저하는 심해지는 것으로 알 수 있다. 이는 원형루프에서 Fig. 9에서 9의 Ra수와 Nu수의 관계에 따라서, Nu, Ra수가 나노유체 농도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타 내었다. Fig. 10에서는 농도와 공급열량에 따른 Nu/Ra의 값의 변화를 그림으로 표시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Ra수의 증가와 더불어 Nu수 역시 증가하는 것으로 관찰할 수 있었다.

#### 4. 결 론

앞의 실험 결과를 바탕으로 각각의 실험 조건에 따라서

첫째, 토로이달 루프 열사이클에서의 단상 자연 대류 열전달 에서는 증류수와 비교해 성능 향상이 극히 미약하거나 없었으며 오히려 농도가 0.05%에서 0.1%로 증가 할 경우 Nu수와 Ra수의 감소를 보여주고 있는 것으로 관찰 되었다.

둘째, 나노유체의 0.001%~0.1%까지 각 농도에서의 각도 변화에 따른 열전달 성능을 비교하면 증류수를 사용할 때와 마찬가지로  $\theta=30^\circ$ ,  $\psi=0^\circ$ 에서 가장 좋은 결과를 보였으나 미약하였으며, 나

노유체를 사용 시 증류수 경우와 유사하거나 못한 결과가 관찰되었다.

나노유체의 사용은 입자 종류, 크기, 모유체, 사용환경, 시스템과의 호환성 등의 많은 변수가 고려대상이 될 것이며, 이는 향후 지속적인 추가 연구가 필요할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

#### 참고문헌

- (1) Keller, J. B., 1966, "Periodic Oscillations in a Model of Thermal Convection," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 26, pp. 599~606.
- (2) Welander, P., 1967, "On the Oscillatory Instability of a Differentially Heated Fluid Loop," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 29, pp. 17~30.
- (3) Greif, R., Zvirin, Y., and Mertol, A., 1979, "The Transient and Stability Behavior of a Natural Convection Loop," *ASME JOURNAL OF HEAT TRANSFER*, Vol. 101, pp. 684~688.
- (4) Creveling, H. F., De Paz, J. F., Baladi, J. Y., and Schoenhals, R. J., 1975, "Stability Characteristics of a Single-Phase Free Convection Loop," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.67, pp. 65~84
- (5) Creveling, H. F., 1964, "Steady Flow and Stability Characteristics of Free Convection Flow in Circulation Loops," Ph.D. dissertation, Purdue University,
- (6) Zvirin, Y., Shitzer, A., and Grossman, G., 1977, "The Natural Circulation Solar Heater Models with Linear and Nonlinear Temperature Distributions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.20, pp. 997~999.
- (7) Zvirin, Y., 1981, "A Review of Natural Circulation Loops in Pressurized Water Reactors and Other Systems," EPRI Report NP-1676-SR, Jan.1981, to appear in *Nuclear Eng.& Design*, Vol. 67, pp. 203~225.
- (8) Zvirin, Y., Jeuck, P. R., Sullivan, C. W., and Duffey, R. B., 1981, "Experimental and Analytical

- Investigation of a Natural Circulation System with Parallel Loop," *ASME JOURNAL OF HEAT TRANSFER*, Vol.103, pp. 645~652.
- (9) Torrance, K. E., 1979, "OPEN-Loop Thermosyphons with Geological Applications," *ASME JOURNAL OF HEAT TRANSFER*, Vol. 101, pp. 677~683.
- (10) Wen, D. and Ding, Y., 2005, "Formulation of Nanofluids for Natural Convective Heat Transfer Applications," *Int. J. of Heat and Flow*, Vol. 26, pp. 855~864.
- (11) Putra, N., Roetzel, W., Das, S.K., 2003 "Natural convection of nanofluids," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 775~784.
- (12) Rhi, S. H et al., 2006, "Development of Nanofluidic Thermosyphon Heat Sink," *SAREK J*, Vol. 18, No. 10, pp. 826~834.
- (13) Rhi, S. H et al., 2006, "Cooling System with Nanofluidic Loop Thermosyphon," *KSME J. B*, Vol. 30, No. 3, pp. 246~254.
- (14) Murshed, S.M.S., Leong, K.C. and Yang, C., 2005, "Enhanced Thermal Conductivity of TiO<sub>2</sub>-Water Based Nanofluids," *International J. of Thermal Sciences*, vol. 44, pp. 367~373.
- (15) Forster, H. K. and Zuber, N., 1955, "Dynamics of Vapor Bubbles and Boiling Heat Transfer", *AIChE J.*, Vol. 1, p. 531.
- (16) Holman, J. P., 1996, "Heat Transfer," McGraw-Hill Book Company, New York, Vol. 8.
- (17) Maxwell, J. C., 1904, "A Treatise on Electricity and Magnetism," Oxford University Press, Cambridge, UK, vol. 2, p. 435.
- (18) Hamilton, R. L. and Crosser, O. K., 1962, "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component Systems," *Ind. Eng. Chem. Fundamen.*, Vol. 2, p. 187.