

## 선회유동장에서 Al-Mg/물 마이크로 유동의 대류 열전달에 대한 실험적 연구

장태현<sup>†</sup> · 김치원\* · 길상철\*\* · 이창환\*\*

### An Experimental Study on the Convection heat Transfer of Al-Mg/water Micro Fluid in a Circular Tube with Swirl

Tae-Hyun Chang<sup>†</sup>, Chi-Woon Kim\*, Sang-Cheol Kil\*\*, and Chang-Hoan Lee\*\*

**Abstract.** In the past decades, extensive studies on convection heat transfer on internal flow have been conducted by using high specific surface area, by increasing heat transfer coefficient and swirl flow, and by improving the transport properties. In this study, we applied a tangential slot swirl generator to improve heat transfer in a horizontal circular copper tube. The Al-Mg particles (approximately 100  $\mu\text{m}$  to 130  $\mu\text{m}$ ) were employed for this experimental work. The copper tube was heated uniformly by winding a heating coil with a resistance of 9ohm per meter for heat transfer. Using Al-Mg particles, experiments were performed in the Reynolds number range of 5,000 to 13,130, with and without swirl. Experimental data transfers or comparisons between Nusselt numbers with and without swirl along the test tube and Reynolds numbers are presented. The Nusselt number is improved by increasing Reynolds numbers or swirl intensities along the test tube.

**Key Words:** micro fluid(마이크로 유동), swirl(선회), bulk temperature(체적온도), Nusselt number

## 1. 서 론

과거 4반세기 동안, 선회유동은 기술적 및 학술적으로 그 이용이 중요하여 광범위하게 연구되어왔다. 그 예로, 관내 유동에서 선회유동은 열전달을 증가시킬 수 있다. Saidur 등<sup>(1)</sup>은 나노유체의 응용과 문제점을 고찰하였고, 그들은 나노유동의 열전도율이 온도의 상승과 함께 15%까지 증가함을 발견하였다. 주제에 대한 많은 연구에도 불구하고, 나노유체에 대한 강화된 정확한 열전달 구조는 불분명하고, 더욱이 많은 문제점은 확인되어야 하고, 다른 이용에 대한 성공을 보증하기 위해 극복되어야 한다.

Ravikanth 등<sup>(2)</sup>은 열물리적 성질에 대한 나노유체의 온도 및 농도의 영향을 분석하였고, 열전도율이 적절

하게 증가될 동안, 나노입자의 추가는 점도를 현저하게 증가시킴을 발견하였다. Zoubida 등<sup>(3)</sup>은 나노유체의 자연 대류열전달을 연구하였고, 이들 유체들은 열전달강화에 큰 잠재력을 가지고 여러 가지 응용에 적합함을 결론지었다.

강제대류 열전달 연구로서는, Mohammed 등<sup>(4)</sup>과 Sohel 등<sup>(5)</sup>은 나노유체의 대류열전달과 비등 열전달을 연구하였다.

Mohammed 등<sup>(4)</sup>은 또한 스텝에서 단일 상의 다른 형태의 열전달 거동과 유체유동을 연구하였다. 그들은 Nusselt 수가 유체의 속도와 Prandtl 수 그리고 종횡비의 증가와 함께 증가함을 알았다. Sohel 등<sup>(5)</sup>은 카본튜브에서 나노유체의 비등 열전달을 연구하였고, 계면활성제의 농도에 따라 비등 열 플럭스를 증가시킬 수 있음을 발견하였다.

이 분야에 선회유동을 이용한 연구로서, Govarthan 등<sup>(6)</sup>은 원형관에서 비틀림 테이프, 균일 열 플럭스(uniform heat flux) 그리고 Fluent 6.326을 이용하여 층류상태에서 나노유체의 열전달을 시뮬레이션 하였

<sup>†</sup>한국과학기술정보연구원, RESEAT 전문연구 위원  
E-mail : changtae@reseat.re.kr

\*경남대학교 기계공학부

\*\*한국과학기술정보연구원 정보분석 센터

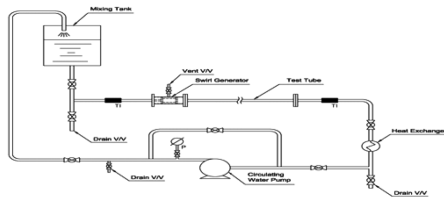


Fig. 1. Experimental Rig.

고, 열전달은 Re 수와 함께 증가하고 비틀림 율과 함께 감소하였다.

Adrian 등<sup>(7)</sup>은 진동이 있는 두 개의 T-교차점에서 마이크로 유동의 선회유동 형태를 연구하였다. Svetlana 등<sup>(8)</sup>은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노입자를 이용하여 마찰계수와 열전달 계수를 측정하였고, 열전달계수는 입자가 없는 순수와 비교하여 33.51% 증가하였다.

이와 같이 선회유동을 이용한 연구는 아주 적은 수로 연구되었다. 본 연구에서는 국내에서 생산되는 Al-Mg입자를 이용하여 물과 함께 마이크로 유동을 만들어 수평원통관에서 균일열유속(uniform heat flux) 상태에서 열전달 특성을 연구하고자한다.

## 2. 실험장치

Fig. 1은 이 연구에 사용된 실험 장치를 나타내고, 실험장치의 직경은 7.7 mm, 길이는 1,000 mm의 동관을 사용하였다. 테스트 튜브는 0.36 kW(120 v × 3 Amp)의 균일 열 플럭스를 사용하고, 열선은 7mm간격으로 균일하게 테스트 튜브를 따라 감고, 열전대는 k-형을 설치하여 LaVIEW 32채널을 사용하여 온도를 측정하였다.

동작유체를 순환시키기 위해 분당 최대 1600cc의 순환 펌프를 사용하고 마이크로 유체의 열을 열교환기에서 냉각하여 다시 재순환 시켰다. 실험 조건은 Table

Table 1. Experimental Conditions

1	Room temperature	25°C
2	Particles	Al/Mg
3	Volume concentration	0.25%
4	Basic fluid	Pure water
5	Heat flux	360 W/120 V
6	Thermocouples	k-type
7	Test tube diameter	7.7 mm ID×1000 mm
8	Swirl generator	Tangential slot
9	Re number	5,000~13,130



Fig. 2. Swirl generator.

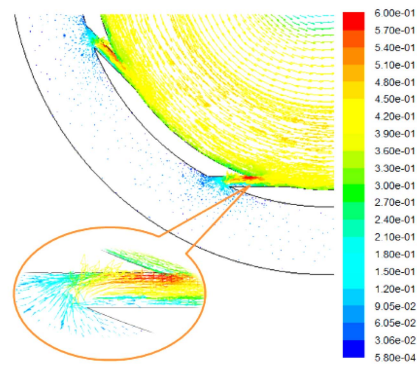


Fig. 3. Velocity profiles at the entry and the swirl chamber.

1에서 나타낸다.

### 2.1 선회발생기 및 내부 유동 검정

Fig. 2에서 선회발생기의 사진을 나타낸다. 25 mm의 접선방향 구멍을 8열로 45도 간격으로 뚫어 가공하였다. 선회발생기 헤드를 제외한 모든 부분은 스테인리스 재료를 사용하였고, 선회발생기를 선회 챔버 내에서 이동할 수 있도록 제작하였다. 즉, 선회 발생기의 위치에 따라 선회강도를 조절할 수 있었다. Fig. 3에서 선회발생기 내에서 유동을 Fluent 6.326을 이용하여 검정하였다.

Fig. 3에서와 같이 선회 발생기의 접선방향 구멍(tangential slot)를 통한 유동은 선회발생기 내에서 강하게 회전하고 있는 것을 볼 수 있다. 선회발생기의 벽 근처에서는 아주 강한 유동을 보이고 중심부에서는 약한 유동, 즉 부의 유동을 나타내고 있다.

### 2.2 마이크로 입자의 열물리적 평가

Al-Mg 마이크로 입자는 국내에서 생산 된 것으로

크기는 100  $\mu\text{m}$ ~130  $\mu\text{m}$ 이고, 체적분율은 0.25%이다. 이 유동의 점도, 입자의 비열 그리고 열전도율은 VISCOMRETER (DV-II+Pro, BROOKFIELD), differential scanning calorimeter (DSC) (Q2000, TAINstruments) 그리고 TPA-501 (Hot Disk Company, Sweden)을 각각 사용하였다. 다음 식들은 마이크로 유동의 상태량을 얻기 위해 사용된 관계식들이다.

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (1)$$

$$\mu_{nf} = (1+2.5\phi)\mu_f \quad (2)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{K_{p+} (n-1)K_{bf} - (n-1)\phi(K_{bf}-K_p)}{K_p + (n-1)K_{bf} + \phi(K_{bf}-K_p)} \quad (3)$$

$$C_{pnf} = (1-\phi)\rho_f C_f + \phi\rho_p C_p / \rho_{nf} \quad (4)$$

Fig. 4에서 Al-Mg와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 비열을 계측한 결과를 나타낸다. 온도의 증가와 함께 두 입자 모두 비열이 증가함을 나타낸다. 이 연구에서 사용한 Al-Mg의 비열은 30°C~85°C 사이의 값을 온도에 따라 사용하여, 위의 식(1)~(4)에 기술한 식들에 대입하여 마이크로 유동의 물리적 상태량을 계산하였다.

### 3. 결과 토의

마이크로 유체온도 및 벽 온도는 테스트 튜브를 따라 k 형 열전대를 이용하여 계측하여 다음 식(5)~(7)에 따라 열유속, 대류 열전달계수와 Nusselt 수를 계산하였다.

$$Q = \dot{m} \times C_p \times (T_{b1} - T_{b2}), \quad (5)$$

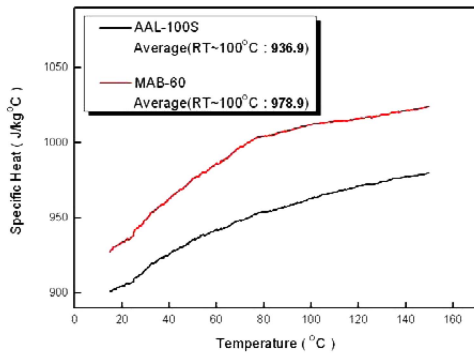


Fig. 4. Specific heat of Al-Mg(MAB-60) and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (AAL-100S) particles.

$$h = \frac{Q}{A_s(T_w - T_b)}, \quad (6)$$

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k}, \quad (7)$$

이 식들에서 Q는 열유속,  $\dot{m}$ ,  $c_p$  그리고 k는 각각 질량유량과 정압비열 열전도율이다. 그리고 h와 Nu는 대류열전달 계수와 Nusselt 수이다. 이 Nu를 Dittus-Boelter 식(8)의 결과와 비교하였다.

$$\text{Nu} = 0.23\text{Re}^n \text{Pr}^m \quad (8)$$

Fig. 5에서 체적온도비( $T_b/T_f$ )를  $\text{Re}=5,000\sim 13,130$ 에 따라 비교하였다. 이 Fig. 5에서  $\text{Tr}$ 은 실내온도이다. 테스트 튜브의 입구에서는 이 비가 0.3 정도의 큰 값을 보이나  $\text{Re}$  수가 증가할 수록 그 차이는 작아지는 것을 볼 수 있다. 즉, 선회가 있는 체적온도는 비 선회유동보다 7.3%~9.7% 높은 상태를 나타낸다. 이는 선회유동의 강한 집선방향 속도에 의한 것으로 생각된다.

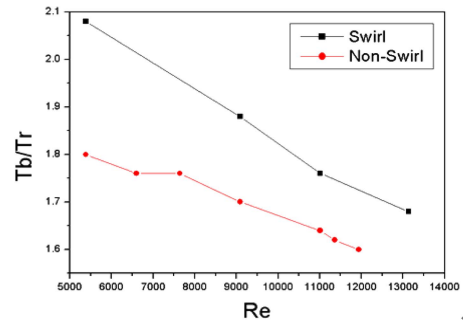


Fig. 5. Bulk temperature distributions for Reynolds numbers with and without swirl.

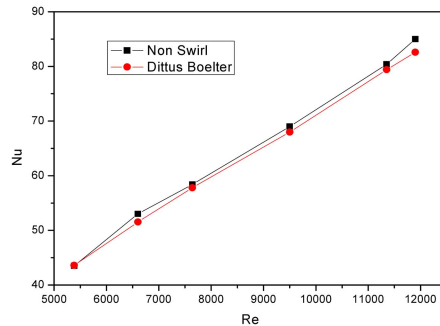


Fig. 6. Comparisons of Nusselt numbers without swirl flow and the Dittus-Boelter equation.

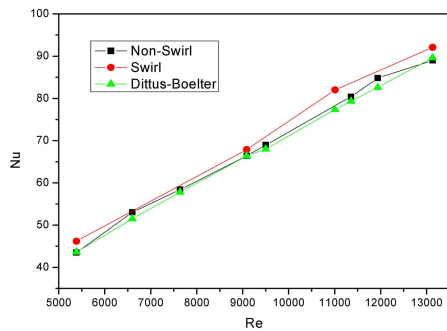


Fig. 7. Comparisons of the Nusselt number distributions with and without swirl for Reynolds numbers.

Fig. 6에서 선회가 없는 Al-Mg 마이크로 유동의 Nusselt 수를  $Re=5,000\sim 12,000$ 에서 Dittus-Boelter 식(8)의 결과와 비교하였다. Al-Mg 마이크로 유동의 Nusselt 수가 1.25%~3.7%의 높은 상태를 나타내었다. 이는 Al-Mg 마이크 입자의 열전도율에 관계된 것으로 생각 된다.

Fig. 7에서 Al-Mg 마이크로 유동이 선회가 있는 경우와 없는 경우의 Nusselt 수를  $Re=5,000\sim 13,130$ 에서 Dittus-Boelter 식의 결과와 비교하였다. 선회가 있는 경우의 Nusselt 수는 선회가 없는 경우보다 2.1% 그리고 Dittus-Boelter 식의 결과 보다 6.2% 높았다. 이 특징은 선회유동의 강한 접선방향 속도와 마찰계수에 관계된 것으로 생각 된다. 그러나 선회가 있는 경우와 없는 경우의 Nusselt 수가 2.1% 높은 것은 테스트 튜브 7.7 mm의 작은 관에서 선회가 빠르게 소멸된 것으로 생각 된다.

Fig. 8에서 현재의 연구결과를 Syam(9)의 결과를  $Re=10,000\sim 13,000$ 에서 비교 하였다. 현재의 연구의

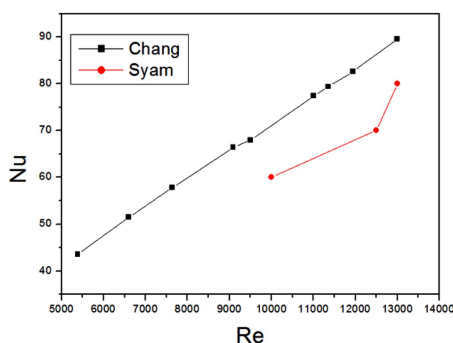


Fig. 8. Comparisons of the Nusselt number distributions with Chang and Syam.

Nusselt 수가 Syam(9)의 것보다 12.0% 정도 높은 값을 나타내었다. Syam(9)은 선회발생기로 비틀림 테이프를 사용하였고, 현재의 연구는 접선방향 슬롯을 사용하였다. 또한 Syam(9)은  $Al_2O_3$ 를 사용한 나노유체이다. 이 두 유체의 열전도율, 선회 발생기 그리고 입자의 크기 등에 관련된 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

Al-Mg/물 마이크로 유동을 사용하여 균일 열유속에서 k 형 열전대와 LaVIEW 32채널을 사용하여 벽온도 체적온도를 구하여 선회가 있는 경우와 없는 경우의 Nusselt 수를 Dittus-Boelter 식의 결과와 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 선회가 있는 경우 Al-Mg/물 마이크로 유동의 체적온도는 선회가 없는 경우보다 7.3%~9.7% 높았다.
2. 선회가 없는 경우의 Al-Mg/물 마이크로 유동의 Nusselt 수는 Dittus-Boelter 식의 결과 보다 1.25%~3.7% 높았다. 이는 Al-Mg 입자의 열전도율에 관계된 것으로 생각 된다.
3. 선회가 없는 경우의 Al-Mg/물 마이크로 유동의 Nusselt 수는 선회가 없는 경우보다 2.0%~2.7% 높았고, Dittus-Boelter 식의 결과 보다 2.1%~6.2% 높았다. 이 특징은 선회유동의 강한 접선방향 속도와 마찰계수에 관계된 것으로 생각 된다.
4. 현재의 연구를 Syam 등(9)의 Nusselt 수와 비교하여 12.0%정도 높았다. 이 차이는 이 두 유체의 열전도도, 선회 발생기 그리고 입자의 크기 등에 관련된 것으로 생각된다.

#### Acknowledgments

This study was financially supported by the Ministry of Education, Science and Technology, along with the Korea Institute of Science and Technology Information as a result of the RESEAT program. ERUDA Co. and JEIL Metal Co. are supported for manufacturing of the experimental apparatus to this research.

#### References

- 1) R. Saidur, K. Y. Leong, H. A. Mohammad, 2011, A

- review on applications and challenges of nanofluids, Renewable and sustainable energy review Vol. 15, pp. 1646-1668.
- 2) Ravikanth S. Vajjha, Debendra K. Das, 2012, A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and pumping power, International journal of heat and mass transfer, Vol. 55, pp. 4063-4078.
  - 3) Zoubida Haddad, Hakan F. Oztop, Eiyad Abu-Nada, Amina Mataoui, 2012, "A review on natural convective heat transfer of nanofluids", Renewable and sustainable energy review Vol. 16, pp. 5363-5378.
  - 4) H.A. Mohammed, A.A. Al-aswadi, N. H. Shuaib, R. Saidur, 2011, "Convective heat transfer and fluid flow over a step using nanofluids", Renewable and sustainable energy review Vol. 15, pp. 2921-2939.
  - 5) S.M. Sohel Murshed, C.A Nieto de Castro, M. J.V. Lourenco, M.L.M. Lopes, F.J.V. Santos, 2011, "A review of boiling and convective heat transfer with nanofluids", Renewable and sustainable energy review Vol. 15, pp. 2342-2354.
  - 6) Govarthan Pathipakka, P. Sivashanmugam, 2010, Heat transfer behavior of nanofluids in a uniformly heated circular tube fitted with helical inserts in laminar flow, Vol. 47, pp. 349-360.
  - 7) Adrian Neild, Tuck Wah Ng, Gregory J., Sheard, Matthew Powers, Stefano Oberti, 2010, Swirl mixing at microfluidic junctions due to low frequency side channel fluidic perturbations, Sensors and actuators B Vol. 150 PP. 811-818.
  - 8) Svetlana Popovic, Miodrag N. Tekic, 2011, Twisted tapes as turbulence promoters in the microfiltration of milk, Journal membrane science Vol. 384, pp. 97-106.
  - 9) L. Syam Sundar, K.V. Sharma, 2010, Turbulent heat transfer and friction factor of  $Al_2O_3$  nanofluid in circular tube with twisted tape inserts, 53, pp. 1409-1416.
  - 10) F. J. Wasp, 1977, Solid-liquid pipeline transportation, Trans, Tech.
  - 11) R.S. Vajjha, D. K. Das, B.M. Mahagaonkar, 2009, Density measurements of different nanofluids and their comparison with theory, Petro. Sci. Tech. 27(6), pp. 612-624.
  - 12) B.C. Pak, Y.J. Cho, 1998, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Exp. Heat Transfer 11(2), pp. 151-170.
  - 13) B.C Sahoo, R.S. R.S. Vajjha, r. Ganguli, G.A. Chukwu, D.K. Das, 2009, Determination of rheological behaviour of aluminium oxides and development of new viscosity correlations, Petro. Sci. Tech. 27(15), pp. 1757-1770.
  - 14) J. Buongiorno, 2006, Convective transport in nanofluids, Journal of heat and mass transfer 128, pp. 240-250.
  - 15) R.L. Hamilton, O.K. Crosser, 1962, Thermal conductivity of heterogeneous two component system, I and EC, Fundamentals 1 pp. 187-191.