

## 비이온계 계면활성제 첨가수에 대한 관내 유동저항 감소 및 열전달 촉진에 관한 연구

김 명 준<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2007년 4월 25일, 심사완료일 : 2007년 6월 14일)

### A Study on the Drag Reduction Effect and Heat Transfer Enhancement of Non Ionized Surfactant and Water Mixture in a Circular Pipe Flow

Myoung-Jun Kim<sup>†</sup>

**Abstract** : This paper has dealt with the effect of non ionized surfactant and water mixture on drag reduction and heat transfer enhancement in a circular pipe flow with experimentally. The test section was consisted of stainless steel pipe with inside diameter of 16mm. The wire coil was used to increase heat transfer in a pipe and the non ionized surfactant(Oleyl Dihydroxyethyl Amine Oxide, ODEAO) was used to reduce the drag force of water mixture with surfactant. The main parameters of this experiment were diameter and pitch of wire coil and the ratio of test section length and horizontal wire coil length. In this experiment, the acquired results were 1) Drag reduction effect existed in this ODEAO-water mixture, 2) Friction factor and heat transfer were increased with insertion the heat transfer enhancement coil, 3) With increasing of pitch ratio, heat transfer was decreased, and 4) Heat transfer was decreased by the decreasing of inserting coil diameter.

**Key words** : Non Ionized Surfactant(비이온계 계면활성제), Drag Reduction Effect(유동저항 감소 효과), Heat Transfer Enhancement(열전달 촉진), Oleyl Dihydroxyethyl Amine Oxide(올레일 디하이드록시틸 아민 산화물)

#### 기호설명

$c_p$  : Specific heat [J/kg · K]

$d$  : Diameter of test section [m]

$e$  : Wire coil diameter [m]

$f$  : Friction factor [-]

$h_x$  : Local heat transfer coefficient[W/m<sup>2</sup> · K]

$k$  : Thermal conductivity [W/m · K]

$L$  : Length of test section [m]

$L_e$  : Fully developed region [m]

$Nu$  : Nusselt number [-]

$P$  : Pitch of wire coil[m]

<sup>†</sup> 교신저자(군산대학교 동력기계시스템공학전공), E-mail:mjkim@kunsan.ac.kr, Tel:063)469-1849

- $Pr$  : Prandtl number [-]
- $q$  : Heat flux [ $W/m^2$ ]
- $Re$  : Reynolds number [-]
- $Re_c$  : Critical Reynolds number [-]
- $T_b$  : Temperature of bulk fluid [K]
- $T_w$  : Temperature of tube wall [K]
- $x$  : Horizontal length of wire coil [m]

그리스 문자

- $\mu$  : Viscosity [ $kg/m \cdot s$ ]
- $\mu_w$  : Viscosity on wall condition [ $kg/m \cdot s$ ]
- $\rho$  : Density [ $kg/m^3$ ]

1. 서 론

효율적인 열유송을 실현하기 위해 열유체로서 물을 사용하고 또한 유동저항 저감제를 첨가함으로써 발생하는 유동저항 감소 효과를 이용하는 방법에 대한 관심이 고조되고 있다<sup>(1)-(3)</sup>. 그러나 계면활성제 등을 이용하여 유동저항을 감소시키는 방법은 많은 연구가 되어오고 있지만, 큰 단점 중의 하나가 열전달의 감소 역시 동시에 발생한다는 것이다<sup>(4)</sup>.<sup>(5)</sup> 따라서 열교환기 등에 이러한 계면활성제 첨가수를 사용할 때는 열전달 촉진제를 삽입하여 난류를 형성시켜 열전달의 향상을 도모하는 방법 등이 제안되고 있다<sup>(7)-(10)</sup>. 이러한 열전달 촉진제는 열유체의 흐름을 난류화 시키고 경계층의 박리효과를 이용하는 것이기 때문에 관내 유동저항은 증가하게 된다. 이와 같은 상충된 2개의 효과에 대한 최적조건을 도출해 내는 것이 최근의 열유체 연구부분에 남겨진 하나의 과제라고 해도 과언이 아닐 것이다.

본 연구는 열전달 촉진제로서 와이어코일을 이용해 열전달 촉진현상을 실험하고 또한 비이온계 계면활성제인 올레일 디하이드록시틸 아민 산화물 (Oleyl Dihydro-xytehyl Amine Oxide, ODEAO)을 이용, 유동저항 감소현상에 대한 실험을 통해 최적의 조건을 도출하고 열교환 시스템에 대한 총체적인 고효율화를 도모하기 위한 기초 자료를 제공하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에는 실험장치의 개략도 및 시험부의 상세도를 나타내고 있다. 실험장치는 직관 시험부, 시험유체 저장탱크, 온도제어부 및 배관계통으로 구성되어 있다. 저장탱크내의 시험 유체는 냉동기(2RT, R-22)에 의해 냉각된 브라인과 열교환을 통해 온도가 제어되고, 유송펌프(최대토출압력  $2kg/cm^2$ )로부터 토출되어 시험부 및 배관내를 유동하고 다시 저장탱크로 되돌아오는 구조로 되어있다. 또한, 시험부 입구에는 충분히 발달한 흐름을 얻기 위한 발달구간을 설치하였다. 발달영역 구간을 다른 말로는 입구영역이라고 한다. 입구영역은 Fig. 1의 7번 기호로 나타내었으며, 차원해석을 통해 이 구간의 길이는 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{L_e}{d} = F(Re) \tag{1}$$

여기서, 함수  $F$ 는 층류와 난류에 따라 달라진다. 해석적 및 실험적인 연구에 의하면 입구길이는 다음의 상관관계식<sup>(6)</sup>을 잘 만족시킨다.

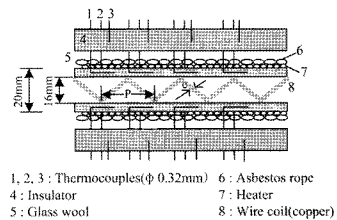
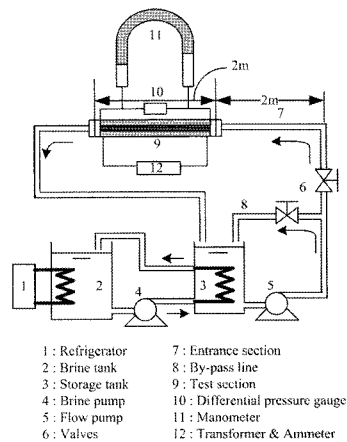


Fig. 1 Experimental apparatus and details of test section

$$\frac{L_e}{d} \approx 0.06 \cdot Re \quad Re \leq 2,300 \quad (2)$$

$$\frac{L_e}{d} \approx 4.4 \cdot Re^{1/6} \quad Re > 2,300 \quad (3)$$

이 식들로부터 구한 발달흐름 구간은  $Re$ 수가 2,300에서 최대가 됨을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 이러한 수식에 기초를 두고, 입계레이놀즈수( $Re_e$ )를 2,300으로 하여 계산한 값(1.987m)보다 여유치를 감안하여 발달흐름을 얻기 위한 입구영역의 길이를 2m로 하였다.

유동저항은 시험부의 입구 및 출구부에 설치한 마노미터 및 차압발신기를 이용해 입구측과 출구측의 압력차를 측정하여 관마찰계수를 산출하였다. 그리고 시험부의 양단에 설치한 전극에 전류를 인가하여 시험부의 저항에 의해 가열되는 등열유속 가열조건을 열경계 조건으로 하였다.

Table 1은 실험 범위를 정리한 것이며, Table 2는 본 실험에서 사용한 유체인 계면활성제 첨가수(2000ppm)에 대한 실측 물성치를 나타내고 있다. 와이어코일은 소선경  $e$ 과 피치  $P$ 와의 비  $P/e = 10, 20, 30, 50$  그리고 와이어코일의 수평길이  $x$ 와 시험부 길이  $L$ 과의 비  $x/L = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ 를 실험 인자로 사용하였다.

**Table 1 Experimental conditions**

Wire coil material	Copper
$x/L$	0.25, 0.50, 0.75, 1.00
$P/e$	10, 20, 30, 50
Additive	ODEAO mixture

**Table 2 Thermo-physical properties of ODEAO mixture and non-dimensional numbers**

Name	Values
Density*	$\rho = 980 \text{ kg/m}^3$
Viscosity*	$\mu = 5.8 \times 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$
Thermal conductivity*	$k = 0.43 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
Specific heat*	$c_p = 3980 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
Prandtl number	$Pr = 53.68$
Reynolds number	$Re = 500\text{--}60,000$
Nusselt number	$Nu = 3\text{--}110$

\* means the measured results of ODEAO and water mixture[2000ppm] in this preparations of experiment at 285.16[K]

유동저항 저감제로는 비이온계 계면활성제인 올레일 디하이드록시틸 아민 산화물(Oleyl Dihydroxyethyl Amine Oxide, ODEAO)을 사용하였다.

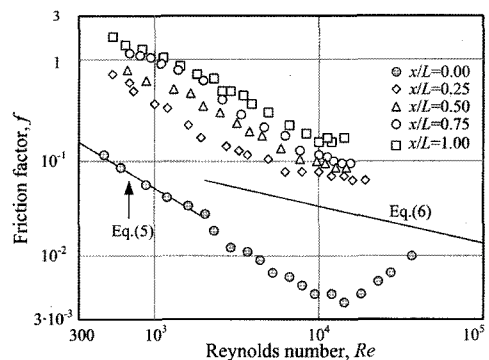
국소열전달율  $h_x$ 는 시험부의 가열조건이 열유속 일정한 조건이기 때문에 관벽에서 공급되는 열량을 산출하고, 관벽의 온도를 열전대로부터 실시간 측정하여 아래의 식으로부터 구했다.

$$h_x = \frac{q}{(T_w - T_b)} \quad (4)$$

이 식에서  $q$ 는 관벽으로 공급되는 열유속을 말하고, Fig. 1에 나타낸 암페어미터로부터 관을 흘러가는 전류량을 구하고 시험부의 양끝단에 설치한 전극으로부터 측정된 전압차 및 시험부의 면적으로 구한 값이다.  $T_w$ 는 관벽의 온도 및  $T_b$ 는 시험유체의 온도를 나타내고 있다. 관벽의 온도는 시험유체의 자연대류 등의 영향을 고려하기 위해 상부 및 하부의 같은 위치에 열전대를 설치하여 그 평균값을 관벽의 온도로 하였으며, 시험유체의 온도  $T_b$ 는 시험부의 입구와 출구에서 측정된 유체의 온도로부터 등간격으로 차분하여 구했다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 실험을 행함에 앞서 수차례에 걸친 예비실험 및 기초실험을 거듭한 결과 ODEAO첨가수는 실험범위인 유속이 1~3m/s의 영역에 대해 약 60~75%의 유동저항 및 열전달 감소가 확인되었다(Fig. 2~4의 ●심볼 참조).



**Fig. 2 (a) Relationships between  $f$  and  $Re$  (effect of  $x/L$ )**

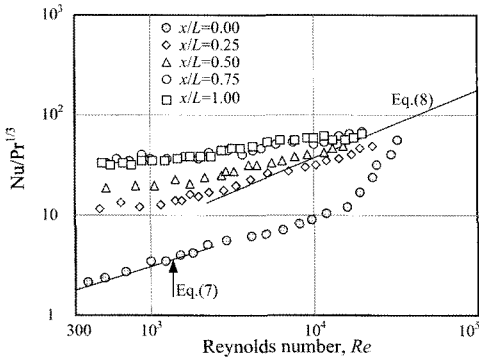


Fig. 2 (b) Relationships between  $Nu/Pr^{1/3}$  and  $Re$  (effect of  $x/L$ )

Fig. 2~4는 열전달 촉진체로서 와이어코일을 사용했을 때의 유동저항 및 열전달 측정결과를 나타내고 있다. 유동저항은 관마찰계수(friction factor), 그리고 열전달은 Chilton-Colburn의 해석을 이용하여 정리했다.

Fig. 2~4에 사용된 관마찰계수  $f$  및 무차원 열전달계수인 Nussel 수  $Nu$ 는 아래와 같다.

층류( $Re \leq 2300$ )의 경우 :  $f = \frac{64}{Re}$  (5)

난류( $Re > 3000$ )의 경우 :  $f = 0.316 Re^{-1/4}$  (6)

층류( $Re \leq 2300$ )의 경우 :

$$Nu = 1.86 (Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{L})^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$
 (7)

난류( $Re > 3000$ )의 경우 :

$$Nu = 0.027 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$
 (8)

Fig. 2는  $x/L$ 을 변화시켰을 때의 유동저항 및 열전달의 변화를 나타내고 있다. Fig. 2로부터 알 수 있는 바와 같이  $x/L$ 을 작게 할수록 열전달은 감소하고 있다. 특히 유동이 층류영역에 대해서는 그 차이가 현저하게 나타나고 있다. 즉, 층류영역에서는 시험유체의 유속이 상대적으로 낮기 때문에 시험관 내에 삽입된 와이어코일의 부착점이 작게 되어 코일의 길이  $x$ 가 짧을수록 경계층을 박리화

시키는 점이 작아져 열전달항상이 큰 폭으로 발생하지 않고 있다. 또한  $x/L=0.75$ 와  $1.0$ 의 경우에는 비슷한 정도의 열전달 향상효과가 나타나고 있다. 즉, 본 실험의 조건 내에서  $x/L$ 이  $0.75$ 이상의 경우에는 열전달 향상효과가 임계에 도달한 것으로 해석할 수 있다. 그러나 전체적인 경향을 보면,  $x/L$ 이 증가할수록 난류촉진효과에 의한 열전달 항상이 존재함을 알 수 있다. 그리고 난류영역으로 되면 부착점의 영향보다 유체 자체의 난류화에 의한 열전달 향상효과가 크게 되고 높은 레이놀즈수에서는 열전달 촉진체인 와이어코일의 영향이 거의 나타나지 않는다고 생각할 수 있다. 다시 말해, Eq.(8)로 나타낸 난류의 상관관계식으로 정리한  $Nu$ 수의 값과 거의 유사한 값을 나타내고 있는 것으로 미루어 보아 난류촉진을 위해 삽입한 와이어코일이 층류영역에서는 경계층을 박리시켜 열전달이 큰 폭으로 상승하지만, 난류의 경우 촉진체를 삽입하지 않더라도 유체 자체의 난류화에 의해 열전달이 향상하고 있음을 알 수 있다.

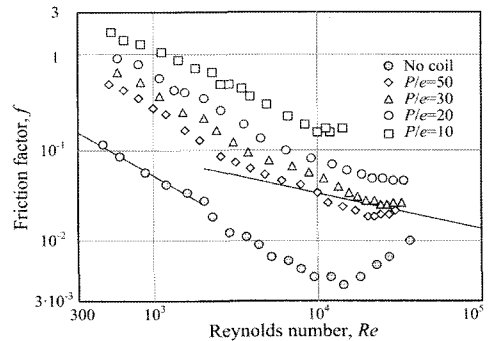


Fig. 3 (a) Relationships between  $f$  and  $Re$  (effect of  $P/e$ )

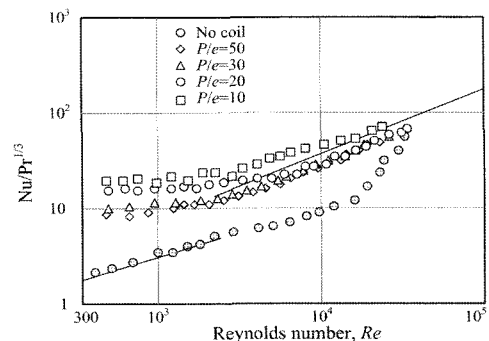


Fig. 3 (b) Relationships between  $Nu/Pr^{1/3}$  and  $Re$  (effect of  $P/e$ )

관마찰계수의 데이터를 살펴보면, 와이어코일을 삽입한 경우의 값이 높아지고 있으며  $x/L$ 이 증가할수록 경계층의 박리현상이 증가하여 관마찰계수가 증가하고 있다.

Fig. 3은 와이어코일의 피치  $P$ 를 변화시켰을 때의 유동저항 및 열전달의 변화를 나타낸 그래프이다. 피치비  $P/e$ 가 증가할수록 유동저항 및 열전달이 감소하고 있음을 알 수 있다. 전술한 바와 같이, 피치비가 증가한다는 것은 와이어코일과 관벽과의 부착점의 감소를 의미하므로 관내흐름이 안정화 되어 유동저항과 열전달이 감소하게 된다.

Fig. 4는 와이어코일의 직경  $e$ 를 변화시킨 경우에 대한 유동저항 및 열전달의 변화를 나타낸 그래프이다. 시험관경  $d$ 와의 비가  $d/e=7.8$ 과  $4.8$ 을 비교해 보면  $P/e=20$ 으로 일정한 경우,  $d/e$ 가 7.8의 경우가 층류영역에서 유동저항 및 열전달의 감소가 있음을 알 수 있다. 이것은 일정한 시험관의 직경에 대하여  $d/e$ 가 증가한다는 것은 와이어코일의 직경이 감소함을 의미한다. 즉, 흐름의 난류화의 감소에 의한 결과로 생각할 수 있다.

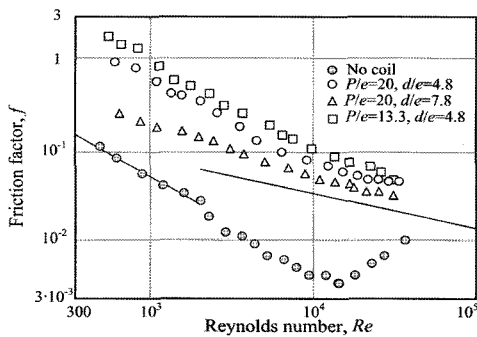


Fig. 4 (a) Relationships between  $f$  and  $Re$

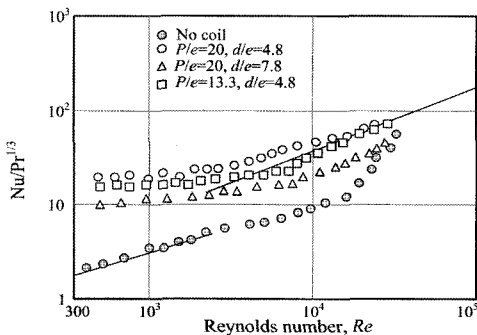


Fig. 4 (b) Relationships between  $Nu/Pr^{1/3}$  and  $Re$

## 4. 결 론

본 연구는 기존의 열교환 시스템이 가지고 있는 문제점 중의 하나인 유송저항의 감소를 도모하기 위해 최근에 들어 사용되고 있는 계면활성제 첨가수를 이용하여 실험을 하였다. 이러한 계면활성제 첨가수는 유동저항이 현저하게 감소하지만 열전달 역시 동시에 감소하게 된다. 본 연구에서는 이러한 현상에 영향을 미치는 파라미터에 대한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비이온계 계면활성에 의한 실험유체의 관마찰계수 및 열전달계수가 감소하고 있음을 알았다.
- (2) 열전달 촉진제를 삽입한 결과, 유동의 난류화에 의해 관마찰계수 및 열전달계수가 상승함을 알았다.
- (3) 피치비( $P/e$ )가 증가할수록 유동저항 및 열전달이 감소하고 있음을 알았다. 즉, 피치비의 증가에 따른 와이어코일과 관벽과의 부착점이 감소하여 관내흐름이 안정화 되어 유동저항과 열전달이 감소함을 알았다.
- (4) 와이어코일의 직경이 감소할수록 난류화의 감소에 의한 결과로 열전달계수의 상승이 작아진다.

## 참고문헌

- [1] 刈米, “界面活性劑の性質と応用”, 幸書房, pp. 55~63, 1988.
- [2] 中村, “新增補三版水溶性高分子”, 化學工學社, pp. 286, 1990.
- [3] 富田, “レオロジー”, コロナ社, pp. 409~410, 1975.
- [4] W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, E. N. Ganio, “Handbook of heat transfer applications” 2nd Edition, pp. 2-1~2-50, 1985.
- [5] T. S. Ravigururajan, A. E. Bergles, “Development and Verification of General Correlations for Pressure Drop and Heat Transfer in Single

Phase Turbulent Flow in Enhanced Tubes", Exp. Therm.Fluid Sci, 13, pp. 55~70, 1996.

- [6] R. B., Bird, W. E., Stewart and E. N., Lightfoot, Transport Phenomena, Wiley, 1960.
- [7] N., Acharya, M., Sen, and H.-C., Chnag, "Thermal Entrance Length and Nusselt Numbers in Coiled Tubes", Int. J. Heat Mass Transfer, 37(2), pp. 336~340, 1994
- [8] E., Achenbach, "The Effect of Surface Roughtness on the Heat Transfer from a Circular Cylinder to the Cross Flow of Air", Int. J. Heat Mass Transfer, 20, pp.359~369, 1977
- [9] J. W., Ackerman, "Pseudoboiling Heat Transfer to Supercritical Pressure Water in Smooth and Ribbed Tubes", J. Heat Transfer, 92, pp.490~498, 1970
- [10] G., Aguilar, K., Gasljevic and E.F., Matthys, "Asymptotes of Maximum Friction and Heat Transfer Reductions for Drag-Reducing Surfactant Solutions", Int. J. Heat Mass Transfer, 44, pp.2835~2843, 2001

## 저 자 소 개



### 김명준(金明俊)

1971년3월18일, 1994년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업(공학사), 1998년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(공학석사), 2002년 일본 오카야마대학 대학원 자연과학연구과 졸업(공학박사), 2002년~2003년 일본 오카야마대학 기계공학부 외국인 객원연구원, 2003.9~현재 군산대학교 해양과학대학 동력기계시스템 공학부 조교수.