

# Wilson plot법을 이용한 Plate & Shell 열교환기의 단상유동 열전달 특성에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on Heat Transfer Characteristics for Single-phase Flow in Plate & Shell Heat Exchangers by Using Wilson Plot Method

서무교 · 김영수 · 이상경

M. K. Seo, Y. S. Kim and S. K. Lee

**Key Words** : Plate & Shell Heat Exchangers(P&SHE), Heat Transfer(열전달), Wilson Plot Method(Wilson plot 법), Nusselt Numbers(넛셀 수), Prandtl Number(프란틀 수)

**Abstract** : Single phase heat transfer coefficients were measured for turbulent water flow in a plate & shell heat exchangers by using Wilson plot method. An experiment for counterflow heat exchange between the plate and shell was performed. The shell side heat transfer resistance was varied and the overall heat transfer coefficients were measured. The single-phase heat transfer coefficients in a plate side were obtained by Wilson plot method. Single-phase heat transfer correlations based on projected heat transfer area have been proposed for a plate & shell heat exchanger.

### 기 호 설 명

- A : 열전달면적, [m<sup>2</sup>]
- C<sub>p</sub> : 정압비열, [J/kgK]
- h : 열전달계수, [W/m<sup>2</sup>K]
- k : 열전도도, [W/mK]
- Nu : 넛셀수 [Nu=hD/k]
- $\dot{m}$  : 질량유량, [kg/s]
- Pr : 프란틀수, [Pr=  $\nu/\alpha$ ]
- Q : 열전달율, [W]
- Re : 레이놀즈수, [Re=  $\rho v d/\mu$ ]
- T : 온도, [K]
- t : 두께, [m]
- U : 총괄 열전달계수, [W/m<sup>2</sup>K]

### 하 첨 자

- h : 1차유체측(온수측)
- c : 2차유체측(냉수측)
- i : 입구
- o : 출구

### 1. 서 론

산업 혁명 이후 인류의 무분별한 에너지 사용으로 인하여 에너지원 자체가 고갈되어 가고 있다. 특히 지난 20년 동안에는 에너지를 사용할 때 발생하는 여러 가지 부산물이 환경에 악영향을 미치며 이제는 지구환경이 오염을 넘어서 파괴에 이르고 있으며, 그 결과로 환경과 에너지 문제는 전 인류가 힘을 모아 함께 해결해야만 할 국제적 문제 중 하나가 되었다.

전 세계는 몬트리올 의정서에 의해 환경을 파괴하는 기존의 CFC 및 HCFC 물질을 규제하고 궁극적으로는 전폐시키려는 의지를 보이는 한편, 이 문제를 해결하기 위해 현재 많은 연구를 진행하고 있다. 이와 같은 관점에서 에너지의 절약은 물론 에너지를 효율적으로 이용하기 위하여 열교환 문제를 보다 더 잘 이해할 필요가 있다. 그러나 열교환 현상을 이용하는 대표적 기기인 열교환기의 설계나 여러 가지 전열현상에 대해서는 별로 관심을 가지지 않는 경우가 많다. 따라서 단위부피당 전열 면적을 극대화 시킨 고밀도 열교환기의 개발과 같은 열교환기와 관련된 고도의 이용기술 개발이 요청되고 있다<sup>1,2)</sup>.

접수일 : 1999년 10월 1일  
서무교, 이상경 : 부경대학교 대학원  
김영수 : 부경대학교 냉동공학과

플레이트&셸 열교환기(P&SHE)와 관련된 국내외의 연구는 거의 전무한 상태이나 이와 유사한 판형열교환기는 식품산업, 화학반응산업이나 다른 산업에 응용분야에 수년간 널리 이용되고 있다<sup>3,4)</sup>. P&SHE의 높은 효율과 고밀도로 인해 냉동과 공조 시스템에서의 P&SHE의 이용은 전망은 밝다.

따라서 본 연구에서는 P&SHE에 있어서 단상유동에 대한 열전달특성에 대해 실험적으로 연구하였다.

냉동공조용 열교환기 모사 실험은 주로 대항류의 2중관에서 관내 냉매유량, 냉매온도, 환상부의 냉각수 유량, 온도 그리고 관벽온도 등을 직접 측정하거나, 혹은 LMTD방법을 적용하기위해 냉매 및 응축수의 입·출구온도 및 유량을 측정한다. 관내열전달계수의 측정은 그것이 단상이든, 2상이든 간에 열교환기 설계를 위해 필수적이다. 관벽온도를 정확히 측정할 수 있으면 관내 열전달계수의 측정은 용이하나, 본 연구에서 사용된 P&SHE에서 판내측의 벽온도의 측정은 불가능하다. 따라서 본연구에서는 판내측의 열전달계수와 셸측의 열전달 계수를 구하기 위해 Wilson plot법을 사용하여 열전달계수를 구하였다.

## 2. Wilson Plot 방법을 이용한 셸측의 열전달계수 측정

Wilson plot법은 열교환기에서 총괄열전달계수를 측정하고 이를 이용하여 관내, 관외 각각의 개별 열전달계수를 구하는 방법으로서 1915년 Wilson이 제안한 이래로 많이 개발되어오고 있다. 본 연구에서는 Wilson plot법을 본 실험에 이용하여 열전달계수를 구하였다. Fig. 2와 같은 대항류열교환시험부에서 총괄열저항은 아래와 같이 표현된다. 단 여기서 파울링저항, 접촉저항 등은 고려하지 않았다.

$$\left(\frac{1}{UA}\right) = \left(\frac{1}{h_h A}\right) + \left(\frac{1}{h_c A}\right) + \left(\frac{t}{kA}\right) \quad (1)$$

총괄열전달계수는 다음과 같이 계산된다.

$$U = \frac{Q_{ave}}{A \cdot LMTD} \quad (2)$$

여기서 대수평균온도차(LMTD)는 채널의 입구와 출구온도로부터 결정된다.

$$LMTD = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (3)$$

여기서

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} \quad (4)$$

$$\Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i} \quad (5)$$

$$Q_h = \dot{m}_h C_p (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (6)$$

$$Q_c = \dot{m}_c C_p (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (7)$$

그리고

$$\frac{|Q_h - Q_c|}{Q_{ave}} < 10\% \quad (8)$$

$$Q_{ave} = \frac{(Q_h + Q_c)}{2} \quad (9)$$

식(1)에서 만약 판내의 열저항을 유량(혹은 Reynolds 수)의 함수로 미리 알고 있다면 판내의 유량을 변화시켜가면서 총괄 열저항을 측정하고 이들의 데이터를 Fig. 1처럼 총괄열저항과 판내의 열저항의 축으로 그리면 직선의 방정식을 구할 수 있다. 이때 세로축의 절편에 해당하는 열저항은 셸측열저항과 판벽에서의 열저항의 합임을 알 수 있다.

관벽에서의 열저항은 기하학적 형상과 관벽의 열전도도만 알면 쉽게 계산되므로 (본 실험에서 사용한 SUS와 같이 열전도도가 매우 큰 경우에는 총괄열저항의 0.5% 미만이므로 무시 가능) 셸측에서의 열저항 혹은 열전달계수를 구할 수 있다<sup>9-12)</sup>.

본 연구에서는 셸측에서의 열전달계수를 구하기

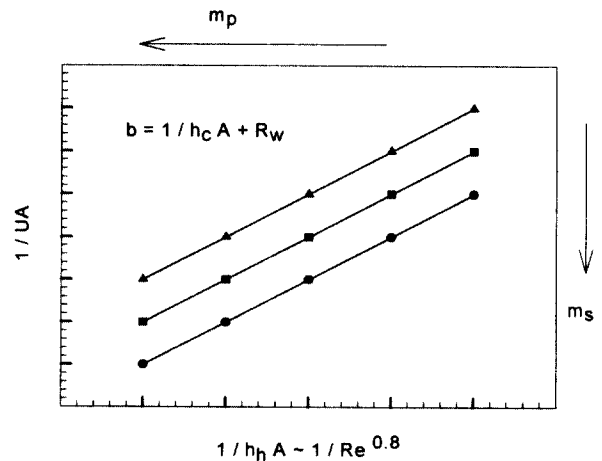


Fig. 1 Concept of Wilson Plot Method

위해 판내측으로는 고온의 물이, 셸측으로는 저온의 물이 대향류로 흐르면서 열교환이 되도록 Fig. 2처럼 실험장치를 구성하고, 셸측의 열저항을 매개변수(parameter)로 하며, 판내측의 고온수의 유량을 변수(variable)로 하여 총괄 열전달계수를 측정하였다. 이를 Wilson plot법으로 데이터를 정리하면 Wilson plot에서의 세로축 절편  $b=1/(h_c A)$  이므로 셸측에서의 열전달계수는  $h_c=1/(bA)$ 로 구하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

플레이트&셸 열교환기의 단상유동전열특성을 분석하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 시험부(test section)의 판사이로는 1차유체로 온수, 셸측에는 2차유체로 냉수가 흐르도록 구성되었다. 1차유체와 2차유체는 각각 항온조를 이용하여 시험부(test section) 입구온도를 조절할 수 있으며 재순환하도록 구성하였다.

시험부의 양측에서의 열손실을 줄이기위해, 전체 시험부는 10cm두께의 폴리에틸렌(polyethylene)으로 싸여져 있다. 시험부에서의 평균열유속은 채널의 입구와 출구사이에 설치된  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 정확도를 갖는 썬스타입(Sheath type) 열전대에 의한 수온도상승의 측정과  $\pm 1\%$ 의 정확도를 갖는 초음파유량계를 이용한 수유량의 측정에 의해 계산된다.

본 연구에서는 1차유체의 온도를  $31.0^\circ\text{C} (\pm 0.5)$ , 2차유체의 온도를  $25.0^\circ\text{C} (\pm 0.5)$ 에서 실험을 행하였으며 전열성능시험에서는 레이놀즈수의 범위는 200 ~ 500 (유량범위 : 8 ~ 22 lpm)이다. 시험부에서의 대향류채널사이의 열전달율은 고온수와 저온수의 유량을 조절하여 변화시켰다. 이때 시스템의 각 변화는 온도의 요동(fluctuation)을 유발한다. 밸브를 이용하여 유량을 적절하게 조절한 다음 각 열전대로부터 10초간격으로 1분동안 데이터를 읽은 후 평균을 취한다. 1분 후에 다시 데이터를 읽어서 각 열전대의 평균온도 차가  $0.5^\circ\text{C}$  이하면 안정상태라고 판단한다. 열전대의 온도차가 하나라도  $0.5^\circ\text{C}$  이상이면 안정상태에 도달할 때 까지의 과정을 반복한다. 안정상태에 도달하면 약 3분동안 5초간격으로 데이터를 읽은 후 평균치를 취한다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 6에서 셸측에서의 열전달 실험결과의 Wilson plot을 나타내었다. 이 그림의 세로축 절

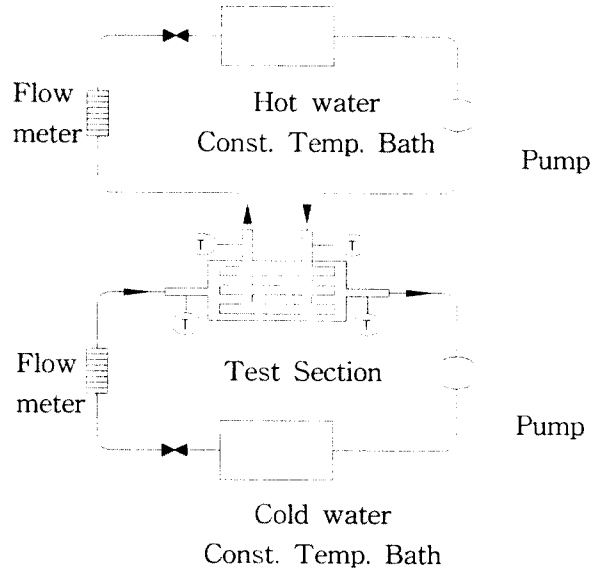


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system

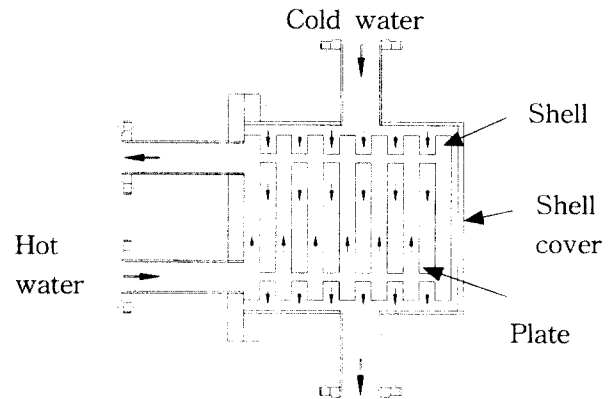


Fig. 3 Details of flow pattern in plate & shell heat exchanger

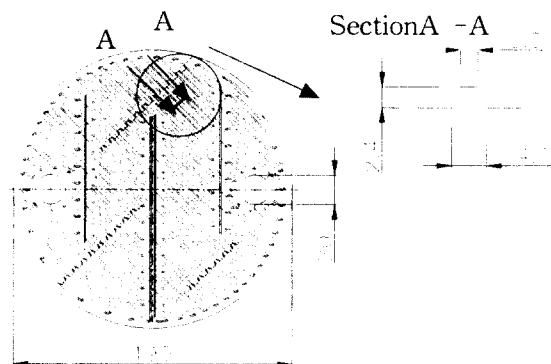


Fig. 4 Schematic diagram of plate & shell heat exchanger

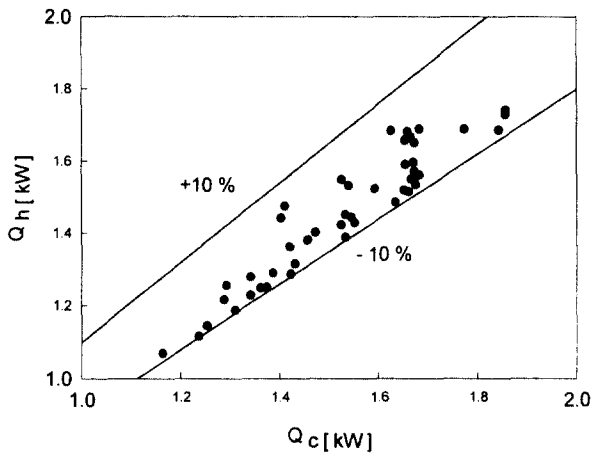


Fig. 5 Heat balance in experimental equipment

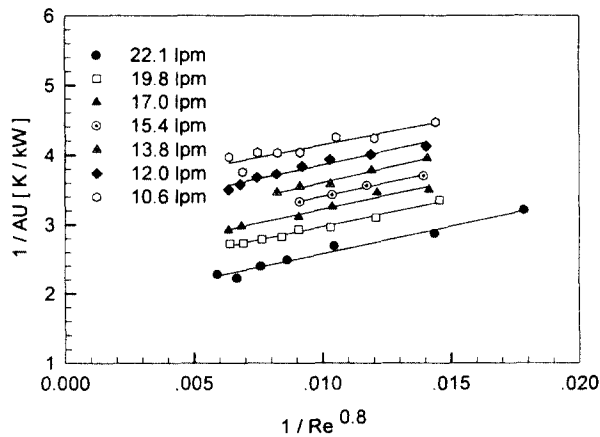


Fig. 6 Wilson plot for shell side heat transfer coefficients

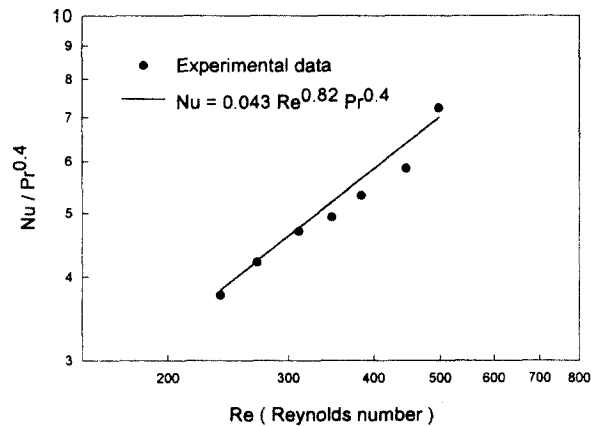


Fig. 7 Heat transfer coefficient in a shell side

편의 값이 셸측에서의 열저항에 해당한다. 이 값으로부터 열전달계수를 구하여 Fig. 7에 그 결과를 나타내었다.

본 실험조건 범위 안에서 Wilson plot법을 적용하여 구한 셸측에서의 열전달계수 데이터로부터 최소자승법을 이용하여 다음과 같은 상관식을 구하였다.

$$Nu = 0.043 Re^{0.82} Pr^{0.4} \quad (10)$$

본 실험은 레이놀즈 수가 200 ~ 500범위에서 수행되었으며 상관식과 실험데이터는 최대오차가  $\pm 6.1\%$ 로 잘 일치하고 있다.

판 측에서의 단상유동 열전달계수를 구하기 위하여 동일한 실험을 수행하였다. 단, 이 경우에는 열전달계수를 구하고자 하는 판 측의 열저항은 매개변수(parameter)로 하며, 셸 측에서의 열저항을 체계적으로 변화시켜가면서 총괄열전달계수를 측정하였다.

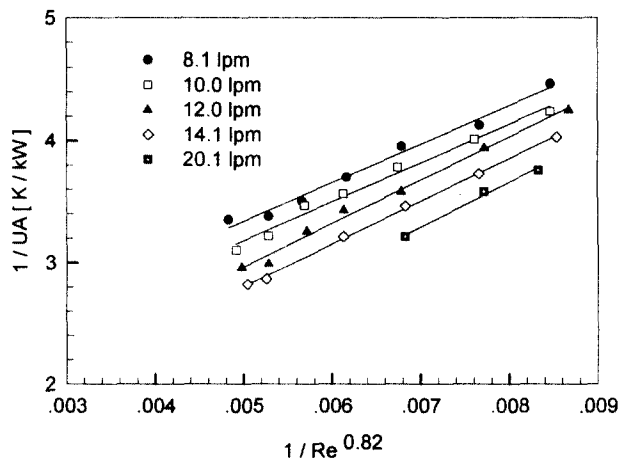


Fig. 8 Wilson plot for heat transfer coefficients in a plate side

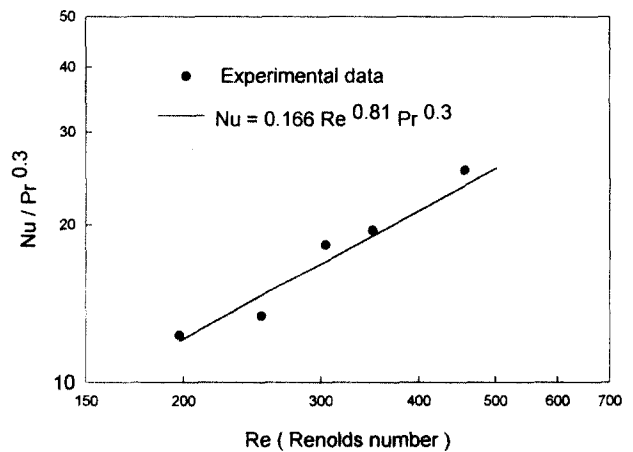


Fig. 9 Heat transfer coefficient in a plate side

측정된 데이터와 앞에서 구한 셸 측에서의 열전달계수 상관식 식(10)을 Wilson plot법에 적용하여 판 측에서의 열전달 계수를 구하였다. Fig. 8에 실험결과를 Wilson plot으로 나타내었다.

Fig. 8의 가로축에 나타낸 셸측에서의 열저항은 본 연구에서 먼저 구해 놓은 상관식 식(10)을 이용하여  $1/Re^{0.82}$ 로 하였다. 판 측에서의 열전달계수에 대한 본 실험에서의 레이놀즈 수는 200에서 500까지 되도록 수행하였다.

본 실험에서 Wilson plot법을 이용하여 구한 판 측에서의 단상유동에 대한 열전달계수를 최소자승법을 이용하여 상관식을 다음과 같이 제안하였다. 판 측에서의 레이놀즈 수 범위는 200~500이며 상관식과 실험데이터는 최대오차가  $\pm 6.8\%$ 로 잘 일치하고 있다.

$$Nu = 0.166Re^{0.81}Pr^{0.3} \quad (11)$$

Fig. 10 에서는 본 실험에서 구한 셸 측의 열전달계수 상관식(10)을 이용하여 추정된 열전달계수와 실험데이터를 비교한 것으로 레이놀즈수 200에서 500사이에서  $\pm 10\%$ 의 정확도를 가지며 레이놀즈수가 200~500 사이에서 열전달계수는 약 1,000~2,200  $W/m^2K$ 의 값을 나타내고 있다. 단, 여기서 열전달계수를 계산할 때 전열면적을 플레이트의 투영면적을 기준으로 계산하였다. Fig. 11은 판에서의 열전달계수를 상관식(11)에 의해 추정된 값과 실험데이터를 비교한 것이며 레이놀즈수 200~500사이에서 열전달계수가 3,000~6,500  $W/m^2K$ 의 값을 나타내며 역시  $\pm 10\%$ 의 정확도를 가진다.

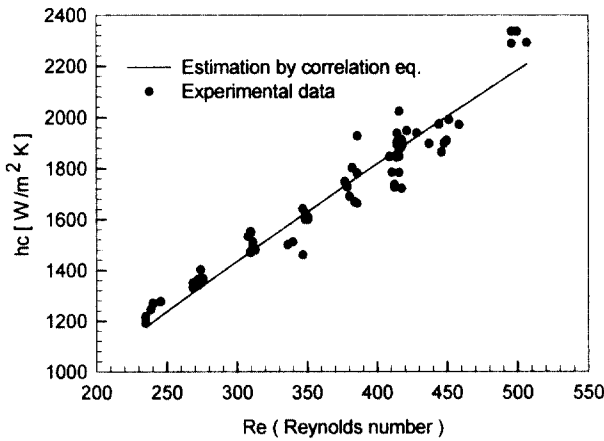


Fig. 10 Heat transfer coefficient variations with the Reynolds number for the shell side

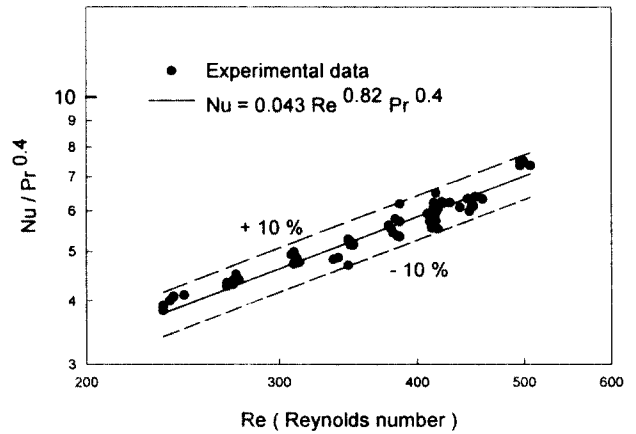


Fig. 12 Comparison between experimental and calculated data using correlation equation of shell side

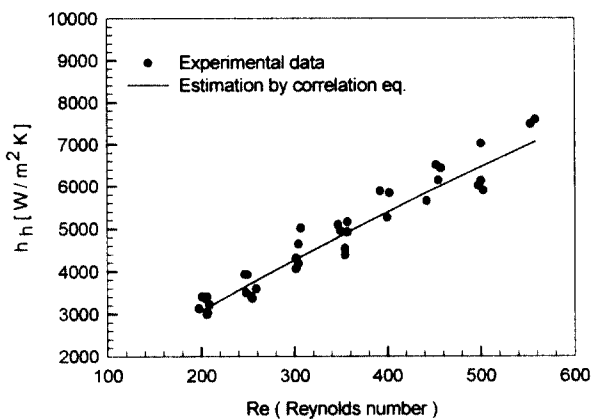


Fig. 11 Heat transfer coefficient variations with the Reynolds number for the plate side

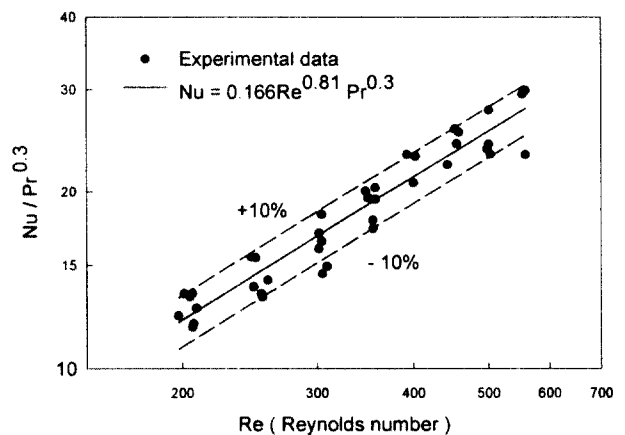


Fig. 13 Comparison between experimental and calculated data using correlation equation of plate side

Fig. 12 에서는 본 연구에서 구한 열전달계수 상관식과 실험데이터를 비교한 것으로 오차범위  $\pm 10\%$ 로 잘 일치하고 있다. Fig. 13 은 판 측에서의 열전달계수 상관식과 실험데이터를 비교한 것으로 역시 오차범위  $\pm 10\%$ 로 잘 일치하고 있다.

## 5. 결 론

Wilson plot법을 이용하여 Fig. 4와 같은 형상과 치수를 갖는 플레이트&셸 열교환기의 물 대 물 (water to water) 단상유동에 대한 열전달 특성에 관한 실험적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 판내측의 관벽온도를 측정할 수 없는 플레이트 & 셸 열교환기에서 Wilson plot법을 이용하여 판측과 셸측의 열전달계수를 구할수 있었다.
- 2) 판측에서의 단상유동에 대한 열전달상관식을 제안했으며, 그 정확도는  $\pm 10\%$ 이내이다.

$$Nu = 0.043Re^{0.82}Pr^{0.4}$$

- 3) 셸측에서의 단상유동에 대한 열전달상관식을 제안했으며, 역시 그 정확도는  $\pm 10\%$ 이내이다.

$$Nu = 0.166Re^{0.81}Pr^{0.3}$$

## 참고문헌

1. W. M. Kays, and A. L. London, "Compact Heat Exchangers." 3rd ed., McGraw-Hill, 1984
2. 황선희, "CFCs 대체물질의 개발동향." 공기조화 냉동공학 제25권 제1호, pp 5~27, 1996
3. Yi-Yie Yan, Hsiang-Chao Lio, and Tsing-Fa Lin, "Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in a plate heat exchanger." Int. J. Heat and mass transfer 42(1999) pp. 993~1006, 1999
4. A. Muley. and R. M. Manglik, "Experimental study of turbulent flow heat transfer and pressure drop in a plate heat exchanger with chevron plates", J. heat transfer Vol. 121, pp. 110~117, 1999
5. R. K. Shah, W. W. Focke, "Plate heat exchangers and their design theory", in: R. K. Shah, E. C. Subbarao, R. A. Mashelkar (Eds.), "Heat Transfer Equipment Design", Hemisphere, Washington, DC, pp. 227~254, 1988
6. S. G. Kandlikar, R. K. Shah, "Multipass plate heat exchangers-effectiveness-NTU results and guidelines for selecting pass arrangements", J. heat transfer 111, pp. 300~313. 1989
7. E. E. Wilson, "A basis for rational design of heat transfer apparatus", Trans. Am. Soc. Mech. Engrs., Vol. 37, pp. 47~70, 1915
8. Y. R. Mayhew, "Additional observations on vapour shear and condensate inundation", Power Condenser Heat Transfer Technology, (eds) Marto, P. J. and Nun, R. H., Hemisphere, pp. 243~247, 1981
9. D. E. Briggs, and E. H. Young, "Modified Wilson plot techniques for obtaining heat transfer correlations for shell and tube heat exchangers", Chemical Engineering Progress Symposium series, No. 92, Vol. 65, pp. 35~45, 1969
10. H. F. Khartabil, R. N. Christensen, and D. E. Richards, "A modified Wilson plot technique for determining heat transfer correlations", 2nd U. K. National conference on Heat Transfer, September. 1988
11. 권정태, 배성원, 김무환, "Wilson Plot Technique을 이용한 열전달계수의 측정", 공기조화 냉동공학회, 하계학술발표회 논문집, pp. 257~261, 1997
12. 권정태, 김무환, "마이크로핀 관내의 단상유동 열전달계수", 공기조화 냉동공학회, 제10권 제4호, pp. 423~430, 1998
13. 이택식 외 3, "계측의 불확실성", 대한기계학회, 1998