판형열교환기의 운전 및 설계변수에 따른 파울링 특성에 관한 연구

The Fouling Characteristics of Plate Heat Exchangers with Geometric and Operating Parameters

전재명(Jaemyeong Jeon)¹, 이응찬(Eungchan Lee)¹, 강 훈(Hoon Kang)², 김용찬(Yongchan Kim)^{2*}

¹고려대학교 기계공학과 대학원, ²고려대학교 기계공학과

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Republic of Korea

²Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Republic of Korea

(Received December 12, 2013; revision received February 27, 2014; Accepted: March 2, 2014)

Abstract The plate heat exchanger has been widely used in water heating systems due to high efficiency, simple structure, and easy maintenance. However, the studies on the effects of fouling on the heat transfer performance under various operation and maintenance conditions are very limited in the open literature. The objective of this study is to investigate the effects of fouling with calcium carbonate (CaCO_3) on the heat transfer characteristics of the plate heat exchanger under various operating and geometric conditions. The heat transfer coefficient and pressure drop in the plate heat exchangers were measured under accelerated fouling conditions with CaCO_3 by varying geometric and operational parameters. The fouling resistance increased with the decrease in the flow rate, and the increase in the chevron angle and the concentration.

Key words Calcium carbonate(탄산칼슘), Fouling(파울링), Heating and service hot water(난방 및 급탕), Plate heat exchanger(판형열교환기)

* Corresponding author, E-mail: yongckim@korea.ac.kr

기호설명

A : 전열면적 [m^2]
 C_p : 비열 [kcal/kg K]
 D_h : 수력직경 [m^2]
 f : 마찰계수, $2\Delta P D_h / L \rho u^2$
 L : 전열판 유효길이 [m]
 $\dot{m}$: 질량유량 [kg/s]
 M : 체적유량 [m^3/h]
 ΔP : 압력차 [kPa]
 Q : 열전달량 [kW]
 R : 오염(fouling)저항계수 [$\text{m}^2 \text{K/W}$]
 Re : 레이놀즈 수, $\rho u D_h / \mu$
 T : 온도 [$^\circ\text{C}$]
 ΔT_{LMTD} : 대수평균온도차 [K]
 U : 총괄열전달계수 [$\text{kW/m}^2 \text{K}$]

그리스 문자

β : 세브론각 [$^\circ$]
 μ : 점성계수 [kg/m-s]

ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

0 : 초기
 avg : 평균(average)
 c : 저온측(cold)
 f, t : 변화량
 h : 고온측(hot)
 in : 입구(inlet)
 out : 출구(outlet)
 t : 시간 변화

1. 서 론

판형열교환기는 전열판을 적층시켜 고온측과 저온측의 유로를 각각 형성하고 형성된 유로에 고온 유체와 저온 유체를 흐르게 하여 유체의 온도 차에 의한 열교환 장치이며, 그 구조는 Fig. 1과 같다. 판형열교환기의 장점은 간단한 구조, 높은 효율, 소형, 간편한 유

지관리 등을 들 수 있다. 앞서 언급한 판형열교환기의 특징으로 인하여 최근 난방조건에서 판형열교환기의 사용이 증가하고 있지만 부적절한 유지 및 보수에 의하여 문제가 발생하고 있다. 이러한 문제는 주로 시설이 열악한 열사용자 측인 중온수 측에서 발생하며, 그 원인은 열교환기의 운전 및 관리에 대한 정보 부족으로 인한 파울링 발생이 대부분이다.

파울링(Fouling)이란 열교환기와 같은 열전달장치의 열전면에 부착되어 성능을 저하시키는 바람직하지 않은 고체 퇴적물을 말한다. 침전 파울링은 열교환기의 가열 면에서 가열될 때 온도의 변화에 따른 용해도의 차이로 인하여 불용성 이온이 열교환기 표면에 침전 또는 퇴적되는 현상을 말하며, 난방 및 급탕용으로 사용되는 열교환기에서 주로 발생한다. 또한 파울링은 사용하고 있는 액체의 성분에 따라 다르게 나타나며 일반적으로 물을 이용한 열교환기에서는 탄산칼슘(CaCO_3)에 의한 파울링이 가장 영향력이 크다.

열교환기를 통한 파울링 생성은 다양한 분야에서 연구되었다. Genic et al.⁽¹⁾은 난방조건에서 판형열교환기의 파울링 저항계수와 유량 간의 관계를 고찰하였다. 실험방법은 가속조건이 없는 수돗물을 이용하여 초기 데이터와 1년 후 같은 열교환기로 측정된 데이터 변화를 비교하였다. 가속조건이 없는 연구는 실제 조건과 흡사하지만 측정시간이 길다는 단점이 있다. 따라서 실험 측정 시간을 단축시키고 파울링 생성에서 큰 영향력을 미치는 탄산칼슘(CaCO_3) 용액을 이용한 가속조건 파울링 연구가 활발히 진행되었다. Thonon et al.⁽²⁾은 가속조건을 이용하여 파울링 저항계수 곡선이 점근적 경향으로 수렴함과 유량과 파울링 저항계수가 반비례 관계임을 실험을 통하여 나타내었다. Yang et al.⁽³⁾은 용해도가 높은 염화칼슘(CaCl_2)과 탄산수소나트

륨(NaHCO_3)의 혼합법을 이용하였다. Kim et al.⁽⁴⁾은 열전달 표면에서 시간에 따른 탄산칼슘(CaCO_3) 결정 크기가 점근적 경향을 보이며 수렴함을 나타내었다. 또한 파울링 결정 발생율은 시간에 따라 반비례함을 고찰하였다. Andritsos et al.⁽⁵⁾은 파울링 형성이 유량의 함수임을 나타내었다. Paakkonen et al.⁽⁶⁾은 열교환 표면에서의 침전 파울링과 결정화 파울링을 고찰하였으며, 열교환면의 온도 변화에 따른 탄산칼슘 파울링의 생성특성을 나타내었다. Mayer et al.⁽⁷⁾은 마이크로 채널 열교환기에서 탄산칼슘(CaCO_3) 파울링 영향을 나타내었다. 파울링 형성으로 인한 열교환기 성능 변화는 열교환기의 유량 감소나 압력강하 증가 및 장치의 성능 저하로 알 수 있다. Paakkonen et al.⁽⁸⁾의 연구를 통해 파울링이 온도 영향이 크다는 특성이 밝혀졌고 이에 따라 난방 및 급탕 조건의 판형열교환기에서 파울링 형성의 정보가 필요한 실정이다. 하지만 기존 연구는 난방 조건이 아닌 낮은 온도조건이거나 개방사이클 및 간단한 실험 장치를 이용한 시스템을 구성하여서 실제 난방 및 급탕에 이용되는 고온의 물대 물 열교환에 사용되는 시스템 및 순환 사이클과의 차이가 있다. 또한 비슷한 시스템 실험은 비가속 실험으로 측정기간이 오래 걸리기 때문에 다양한 변수들을 통한 파울링 고찰에 어려움이 있었다.

본 연구에서는 파울링 형성에 큰 영향을 주는 탄산칼슘 용액을 이용하여 가속 환경을 부여하고 고온의 난방 및 급탕 조건에서 실제 물대물 시스템을 최소화하여 판형열교환기의 형상 및 설계 변수에 따른 파울링 형성 특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 2는 판형열교환기를 이용한 파울링 형성을 고찰하기 위한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 판형열교환기를 이용한 실험장치는 물대 물의 강제순환 사이클로 히팅 유닛, 쿨링 유닛 그리고 시험부의 세 부분으로 구성하였다. 히팅 유닛은 난방 및 급탕 시 열원을 제공하는 고온수 역할을 하고 쿨링 유닛은 가열되는 중온수 역할을 하도록 모사하여 제작하였다. 시험부 열교환기는 교체가 가능하게 제작하였다. 파울링 실험은 저온측인 쿨링 유닛에 파울링을 형성시켜 실험하였다. 파울링 실험 변수는 세브론각, 저온측 유량, 저온측 탄산칼슘 솔루션의 농도이며 자세한 사항은 Table 1에 나타내었다. 온도는 RTD 센서를 이용하여 판형열교환기 입·출구 온도를 측정하였다. 압력측정은 절대압력계를 이용하여 측정하였다. 순환부의 유량은 인버터를 장착한 펌프와 유량 조절밸브를 통해 조절하고 유량계로 측정하였다. 탄산칼슘 농도 측정은 농도측정기를 이용

Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

Fig. 2 Schematic of the experimental setup.

Table 1 Test conditions

Parameter	Unit	Value
Chevron angle(β)	°	30/30, 60/60
Hot Temperature($T_{h,in}$)	°C	75(± 0.1)
Hot Pressure(P_h)	kPa	160($\pm 0.5\%$)
Hot Flow rate(M_h)	m ³ /h	1.0(Re 6500)
Cold Temperature($T_{c,in}$)	°C	15(± 0.1)
Cold Pressure(P_c)	kPa	120 ~ 360($\pm 0.5\%$)
Cold Flow rate(M_c)	m ³ /h	0.3, 0.6, 0.9 (Re 2100 ~ 5600)
CaCO ₃ Concentration	ppm	1000, 2000, 3000 (± 1 ppm)
Heat transfer rate	kW	8.0 ~ 22.0

하여 총 용존 고형물농도(TDS : Total dissolved solids)를 10분 단위로 측정하였다. 실험장치의 농도 변화는 시험부의 열교환기의 크기에 비해서 항온조의 크기가 상당히 크기 때문에 실험 중 농도의 변화는 무시할 수 있는 수준이었다. 각 측정변수의 정확도는 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험결과 처리 방법

파울링 실험에서 유체의 물성치는 입·출구 온도의 체적 평균온도를 사용하여 계산하였으며 열교환기 내에서의 고온 및 저온측의 열전달량과 총괄열전달계수를 구하기 위해 ΔT_{LMTD} 는 식(1)~식(5)의 방법으로 구하였다.

$$Q_h = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (1)$$

$$Q_c = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (2)$$

$$Q_{avg} = (Q_h + Q_c) / 2 \quad (3)$$

$$Q_{avg} = UA \Delta T_{LMTD} \quad (4)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{[(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})]}{\ln[(T_{h,in} - T_{c,out}) / (T_{h,out} - T_{c,in})]} \quad (5)$$

파울링 실험에서 파울링 저항계수는 식(6)과 식(7)의 총괄열전달계수를 이용하여 초기의 총괄열전달계수값과 시간 t에서의 총괄열전달계수를 구한 후 각각 역수를 취하여 그 차를 이용하여 계산하였고, 이를 식(8)에 나타내었다.

$$U_0 = \frac{Q_{avg,0}}{A \Delta T_{LMTD,0}} \quad (6)$$

$$U_t = \frac{Q_{avg,t}}{A \Delta T_{LMTD,t}} \quad (7)$$

$$R_{f,t} = \frac{1}{U_t} - \frac{1}{U_0} \quad (8)$$

총괄열전달계수와 마찰계수는 시간 t의 변화에 따른 증감률은 식(9)와 식(10)에 나타내었다. 마찰계수는 식(10)과 식(11)을 이용하였다.

$$U_{f,t} = U_t / U_0 \quad (9)$$

$$f = \frac{2 \Delta P D_h}{\rho u^2 L} \quad (10)$$

$$f_{f,t} = f_t / f_0 \quad (11)$$

열전달량, 압력강하, 유속, 마찰계수, 그리고 파울링 저항계수 값의 불확실도는 Moffatt⁽⁹⁾의 방법을 사용하여 계산하였다. 계산된 열전달량, 마찰계수, 유속, 압력강하, 그리고 파울링 저항계수 값의 최대 오차는 각각 $\pm 4.9\%$, $\pm 1.4\%$, $\pm 1.2\%$, $\pm 2.6\%$, $\pm 12.7\%$ 로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 농도변화에 따른 파울링 형성 특성

관형열교환기에서 운전 시간이 지남에 따라 초기 설계용량과 실제용량이 달라지는 문제가 발생한다. 이의 주된 원인은 관형열교환기 내부의 파울링 형성으로 인한 효율저하로 볼 수 있다. 대부분 난방에 사용되는 물은 상수도가 사용되지만 경우에 따라 지하수 및 하천수가 사용된다. 또한 파울링 형성에서 가장 많은 비중을 차지하는 성분은 관한 연구결과에서 탄산칼슘(CaCO₃)이 주요인자로 연구되어 본 연구에서 탄산칼슘 농도에

Fig. 3 Variation of the fouling resistance with CaCO_3 concentration.

Fig. 4 Variation of the ratio of the overall heat transfer coefficient with CaCO_3 concentration.

따른 파울링 저항계수 측정 실험을 수행하였다.

농도에 따른 파울링 저항계수 실험은 고온의 물대 물 운전 조건에서 수행하였다. Fig. 3~Fig. 5는 탄산칼슘 농도 변화에 따른 파울링 저항계수, 총괄열전달계수, 그리고 마찰계수 변화를 각각 나타내고 있다. 파울링 저항계수는 탄산칼슘 농도가 높을수록 증가하며, 전체적인 경향은 증가하다가 일정 시간 이후 수렴하는 곡선을 나타내었다. 낮은 농도인 1,000 ppm의 느린 변화에 비해 3,000 ppm에서는 파울링 생성 전과 비교한 결과 최대 20% 이상의 차이가 나타났다. 총괄열전달계수의 감소도 3,000 ppm에서 가장 높게 나타났으며 마찰계수 역시 3,000 ppm에서 가장 높게 나타났다. 특히 마찰계수가 3,000 ppm부터 큰 차이를 보이는 이유는 고온에서의 낮은 탄산칼슘 용해도 때문에 일정 농도 이상에서 파울링이 과다 생성됨으로써 유로 단면적이 급격히 감소하여 생기는 결과인 것으로 판단된다.

Fig. 5 Variation of the ratio of the pressure drop with CaCO_3 concentration.

Fig. 6 Variation of the fouling resistance with the flow rate in the cold side.

3.2 유속변화에 따른 파울링 형성 특성

관형열교환기 난방조건에서 운전변수인 저온측 유속 변화에 따른 파울링 저항계수의 변화를 실험하였다. Fig. 6는 저온측 유량 변화에 따른 파울링 저항계수를 비교한 것이다. 파울링 저항계수는 유량 증가에 따라 유속이 증가하여 파울링 저항계수가 감소하는 경향을 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8은 유량에 따른 총괄열전달계수와 마찰계수를 나타내었으며, 유량이 낮아질수록 유속이 낮아져 총괄열전달계수는 낮게 나타났다. 또한 유량 0.6 m^3/h 미만의 경우 마찰계수가 급격히 증가하는 경향을 보였으며, 이는 일정유량 이상에서는 유속이 증가하여 파울링 형성이 어려운 것으로 판단된다.

또한 시간 스케일을 30분 정도의 초기 시간으로 확대하여 나타낸 Fig. 9에서는 유량에 따라 파울링 생성 시작 시간이 다르다는 것을 알 수 있었다. 체적유량이

Fig. 7 Variation of the ratio of overall heat transfer coefficient with the flow rate in the cold side.

Fig. 9 Delay of fouling initiation with the flow rate.

Fig. 8 Variation of the ratio of the pressure drop with the flow rate in the cold rate.

Fig. 10 Variation of the fouling resistance with chevron angle.

0.9 m³/h로 점차 증가 할수록 유속의 증가로 파울링 지연시간이 길어졌다. 유량의 증가로 인한 유속의 증가는 전체적인 파울링 저항계수의 값을 낮추는 동시에 생성 시작 시간을 지연시켜주는 역할도 가능함을 알 수 있다.

3.3 형상변수에 따른 파울링 형성 특성

형상변수인 세브론각의 변화에 따른 난방조건의 판형열교환기 파울링 저항계수 실험을 수행하였다. Fig. 10은 세브론각 변화에 따른 파울링 저항계수 비교이며 결과로는 높은 세브론각에서 파울링 저항계수가 높게 나타났다. 세브론각의 증가에 따라 파울링 저항계수가 증가된 이유는 전열판에서의 유체의 저항이 증가하여 유체가 전열면에 닿는 시간이 증가하기 때문이다. 유체가 전열면에 닿는 시간이 증가할수록 높은 열전달계수를 보이는 만큼 파울링 형성도 높게 나타났다.

Fig. 11는 총괄열전달계수의 변화를 나타내며, 세브론각의 증가에 따라서 총괄열전달계수는 낮아지는 경향을 보이고 높은 세브론각은 낮은 각에 비해서 약 3 배정도 더 감소하는 경향이 나타났다. 이는 앞서 말한 전열면에 닿는 시간의 증가로 파울링 생성 증가만큼 총괄열전달계수가 감소하기 때문이다. Fig. 12에서 마찰계수의 경우는 세브론각의 증가가 높을수록 높은 마찰계수를 보이며 이유는 높은 세브론각에서 파울링의 생성량이 많아 판형열교환기 채널에서 저항의 증가로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 판형열교환기의 시간의 경과에 따른 탄산칼슘(CaCO₃) 파울링 실험을 통하여 판형열교환기에서의 형상 및 설계변수 따른 파울링 형성을 고찰하였다. 파울링은 시간이 지남에 따라서 증가하다 일정 수준에 수렴하는 경향을 보이며 탄산칼슘(CaCO₃) 농도의 증

Fig. 11 Variation of the ratio of the overall heat transfer coefficient with chevron angle.

Fig. 12 Variation of the ratio of the pressure drop with chevron angle.

가에 따라서 파울링 저항계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 유량이 증가할수록 파울링 저항계수가 작아지는 경향을 나타내었으며, 유량 증가에 따라 파울링 생성 지연효과가 나타났다. 형상변수로 세브론각 변화에 대한 파울링 생성은 높은 세브론각 60°(60°/60°)에서 파울링 저항계수가 크게 나타났다. 세브론각의 증가에 따른 장점은 열전달계수의 증가이지만 파울링 저항계수 증가 또한 크게 나타나기 때문에 세브론각의 최적 설계가 요구된다. 유량의 증가는 파울링 계수의 감소와 형성 시작 시간을 지연시켜주는 역할이 가능하다. 탄산칼슘의 농도 증가는 파울링의 형성을 증가시키므로 수질 유지 및 주기적인 관리를 통하여 파울링 저항계수를 낮추는 노력이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국산업기술평가관리원(과제번호 : 1003

5530)과 한국에너지기술평가원(KETEP)(과제번호 : 20124010203250)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Reference

1. Genic, S. B., Jacimovic, B. M., Mandic, D., and Petrovic, D., 2012, Experimental determination of fouling factor on plate heat exchangers in district heating system, *Energy and Buildings*, Vol. 50, pp. 204-211.
2. Thonon, B., Grandgeorge, S. and Jallut, C., 1999, Effect of geometry and flow conditions on particulate fouling in plate heat exchangers, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 12-24.
3. Yang, Q., Ding, J., and Shen, Z., 2000, Investigation on fouling behaviors of low-energy surface and fouling fractal characteristics, *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, No. 4, pp. 797-805.
4. Kim, W. T. and Cho, Y. I., 2000, Experimental study of the crystal growth behavior of CaCO₃ fouling using a microscope, *Experimental Heat Transfer*, Vol. 13, No. 2, pp. 153-161.
5. Andritsos, N. and Karabelas, A. J., 2003, Calcium carbonate scaling in a plate heat exchanger in the presence of particles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 24, pp. 4613-4627.
6. Paakkonen, T. M., Riihimäki, M., Puhakka, E., Muurinen, E., Simonson, C. J., and Keiski, R. L., 2009, Crystallization fouling of CaCO₃-effect of bulk precipitation on mass deposition on the heat transfer surface, *Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning VII*, Austria, pp. 209-216.
7. Mayer, M., Bucko, J., Benzinger, W., Dittmeyer, R., Augustin, W., and Scholl, S., 2012, The impact of crystallization fouling on a microscale heat exchanger, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 40, pp. 126-131.
8. Paakkonen, T. M., Riihimäki, M., Simonson, C. J., Muurinen, E., and Keiski, R. L., 2012, Crystallization fouling of CaCO₃-Analysis of experimental thermal resistance and its uncertainty, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 23, pp. 6927-6937.
9. Moffatt, R. J., 1988, Describing the Uncertainties in Experimental Results, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-17.