

# 세척이 가능한 원통 코일형 열교환기의 파울링 특성에 관한 연구

## Fouling Characteristics of Washable Shell and Coil Heat Exchanger

황준현(Jun Hyeon Hwang)<sup>1</sup>, 나병철(Byung Chul Na)<sup>1</sup>, 오세기(Sai Kee Oh)<sup>1</sup>,  
구경민(Kyoung Min Koo)<sup>2</sup>, 이재근(Jae Keun Lee)<sup>3</sup>, 안영철(Young Chull Ahn)<sup>4†</sup>  
<sup>1</sup>LG전자 SAC 연구소, <sup>2</sup>부산대학교 기계공학과, <sup>3</sup>에코에너지 기술 연구소, <sup>4</sup>부산대학교 건축공학과  
<sup>1</sup>SAC R&D Laboratory, LG Electronics, Gyeongnam, 641-711, Korea  
<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea  
<sup>3</sup>EcoEnergy Research Institute, Busan, 618-230, Korea  
<sup>4</sup>Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

(Received September 11, 2014; revision received November 6, 2014; Accepted: November 7, 2014)

**Abstract** In this work, we studied the shell and helically coiled tube heat exchangers. Shell and coil heat exchangers with different rate of water flow and plate heat exchanger with same capacity were tested for condensing conditions. We proposed design guide using modified Wilson plot method. We compared fouling characteristics between shell and coil heat exchanger and plate heat exchanger, when they were washed and were not washed. The shell and coil heat exchanger showed 120% of higher saturated fouling resistance value and 4% of better heat transfer ratio than the plate heat exchanger.

**Key words** Shell and coil heat exchanger(원통 코일형 열교환기), Plate heat exchanger(판형 열교환기), Fouling(파울링), Heat transfer ratio(열전달비)

† Corresponding author, E-mail: ycahn@pusan.ac.kr

### 기호설명

$R_o$  : 관외측 대류 열저항 [ $m^2K/W$ ]  
 $R_{fo}$  : 파울링에 의한 관외측 열저항 [ $m^2K/W$ ]  
 $R_i$  : 관내 전도 열저항 [ $m^2K/W$ ]  
 $R_i$  : 관내측 대류 열저항 [ $m^2K/W$ ]  
 $R_{fi}$  : 파울링에 의한 관내측 열저항 [ $m^2K/W$ ]  
 $R_f$  : 포화 파울링 열저항( $m^2K/W$ )  
 $t_o$  : 시정수(시간)  
 $U$  : 총괄 열전달 계수 [ $W/m^2K$ ]  
 $Q$  : 열전달량 [ $W$ ]  
 $Q_o$  : 초기 열전달량 [ $W$ ]

### 1. 서 론

빌딩이나 공장 설비의 가열 냉각 시스템에 활용되는 대형 공조 설비나 시스템어컨에서는 고효율, 설치면적 최소화를 위해 수열원 시스템이 주로 사용된다. 수열원에는 시수나 지하수, 하천수 등이 다양하게 사용하게 되며, 경수가 응축기, 증발기, 보일러와 배관등과 같

은 열교환기 내에서 가열되거나 냉각될 때 스케일이 생성된다. 스케일의 종류는 수질 내 광물량에 따라 다르며, 주로 탄산칼슘, 황산칼슘, 황산바륨, 이산화규소, 철 성분이 포함된 유체를 사용하는 산업체에서 흔히 발생된다.<sup>(1, 2)</sup> 스케일은 석회석과 대리석의 성분인 탄산칼슘이 대표적이며, 스케일이 열교환기 표면에 침전되어 쌓이게 될 경우, 통상 파울링(Fouling)이라 지칭한다.

스케일이 열교환기 표면에 침전할 경우, 크게 두 가지 문제가 발생된다.<sup>(3)</sup> 첫째는 열교환기의 성능 저하이다. 스케일의 낮은 열전도도로 인해 열교환기에 침전된 스케일은 총괄 열전달 성능을 점진적으로 감소시킨다. 두 번째는 관내 침전물로 인한 유로 면적이 감소되어 유량을 감소시키며, 이는 열교환기 내의 유로 압력강하를 증가시킨다.

기존 연구들은 판형 열교환기나 원통 튜브형 파울링에 대한 성능 특성에 대해 집중되어 왔으며, 물리적으로 세척이 가능한 고효율 물 냉매 원통 코일형 열교환기의 파울링 특성에 대한 연구는 전무한 실정이다. Sung

et al.<sup>(1, 2)</sup>은 냉각탑의 파울링과 상수도 및 하천수 수질과의 관계에 대한 연구를 진행하였다. Thonon et al.<sup>(3)</sup>은 파울링 시험을 진행하기 위한 분말의 농도를 규명함으로써 입자 선정의 기준을 제시하였으며, pH에 영향을 받지 않는 CaCO<sub>3</sub>를 표본으로 진행하였다. 본 연구는 세척이 가능한 원통 코일형 열교환기의 파울링에 따른 성능 저하 및 회복에 대한 특성을 관형 열교환기와 실험적으로 비교 분석하고, 관형 열교환기가 장착된 현장의 열매체 샘플을 통해 파울링 입자 분석을 진행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치의 구성

Fig. 1은 파울링 가속장치에 대한 그림이다. 2개의 독립 순환 회로를 통해, 인위적 분말을 일정 농도로 주입하고, 정확도 0.4%의 Omega사 T타입 열전대와 정확도 0.1%의 UNIK 5000 모델의 압력계 그리고 정확도 0.5%의 TF 220 모델의 질량유량계로 열전달량 13%의 불확실성에서 실험을 수행하였다.

사용한 분말은 Table 1과 같이 CaCO<sub>3</sub>을 주입하고, 탁도 및 열저항이 일정하게 되는 2,000분 동안의 성능 변화를 관찰하였다. 본 실험은 탁도계(HACH 2100AH)로 측정된 5,000 NTU 조건에서 수행되었으며, 본 탁도는 수질이 좋지 않은 필리핀의 100 NTU 경우보다 50배 많은 가혹조건에서 진행하였다. Table 2의 각기 다른 열교환기에서 발생하는 압력강하와 열저항값을 측정하

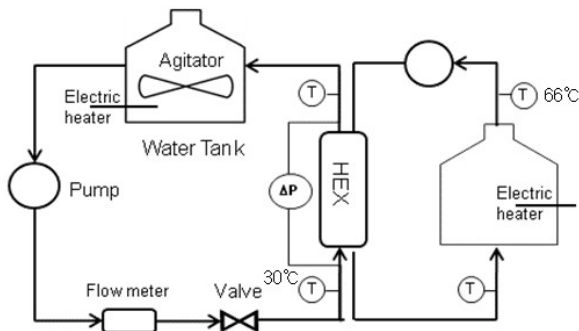


Fig. 1 Schematic diagram of fouling test.

Table 1 Fouling test conditions

Category	Value
Powder	CaCO <sub>3</sub> , Size 4 μm Density 4.5 kg/m <sup>3</sup>
Water Flow Rate	1,000 and 3,000 kg/h
Water Temperature	66°C/30°C

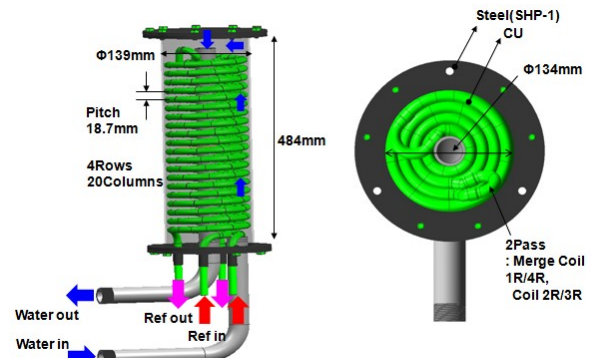
고, 6,000분마다 물리적인 세척을 통해 열교환기 성능 회복 특성을 평가하였다.

### 2.2 원통 코일형 열교환기 구성

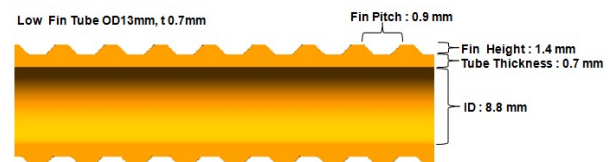
Fig. 2는 신형상으로 설계된 원통 코일형 열교환기의 사양을 표기하고 있다. 분리 가능한 원통과 코일로 구성된 열교환기에서 코일 내부로는 냉매가 흐르며 원통 내부와 코일 외부로는 물이 흐르도록 되어있다. 전열면적의 증가를 통한 성능 확보를 위해, Low Fin Tube<sup>(4)</sup>를 열별로 상이하게 감아 코일이 원통 내부에 밀착하도록 하였다. 또한, 세척의 용이성을 위해 코일의 1열부터 4열까지 나란하게 배열함으로써, 외부에서 물리적인 청소를 용이하게 할 수 있도록 하였다. 냉매측 압력 강하량을 균등하게 하여, 서로 다른 길이의 1열과 4열, 2열과 3열을 합지한 두 개의 패스를 구성하여 냉매 분

Table 2 Specifications of heat exchanger

Type	Shell and Coil	Blazed Plate
Model	Designed	Alfalaval AC 46
Capacity	14.5 kW	14.5 kW
Width(Dia.)×Height	134×484 mm	180×370 mm
Volume	0.011 m <sup>3</sup>	0.0053 m <sup>3</sup>
Tube(Plate) Shape	Low fin OD 13 mm, 0.7 t	Plate pitch 1.5 mm, 0.5 t
Tube(Plate) Number	4	45



(a) Specifications of the shell and coil



(b) Specifications of the low fin tube

Fig. 2 Shell and coil heat exchanger.

배에서의 쏠림을 최소화하였다.

4열까지 나란하게 배열함으로써, 외부에서 물리적인 청소를 용이하게 할 수 있도록 하였다. 냉매측 압력 강하량을 균등하게 하여, 서로 다른 길이의 1열과 4열, 2열과 3열을 합치한 두 개의 패스를 구성하여 냉매 분배에서의 쏠림을 최소화하였다.

### 2.3 실험 상관식

식(1)과 같이, 총괄 열저항은 코일 외측, 코일 내측 열전달계수의 역수와 파울링에 의해 형성된 열저항을 합한 값과 같으며, 파울링에 의한 코일 외측 열저항값은 파울링이 발생된 시점의 총괄 열전달계수와 세척 이후의 총괄 열전달계수의 역수의 차와 같다. 본 연구는 코일 내측 냉매 파울링 보다 영향도가 큰 코일 외측 물측 파울링에 의한 증가폭에 중점을 두고 수행되었다.

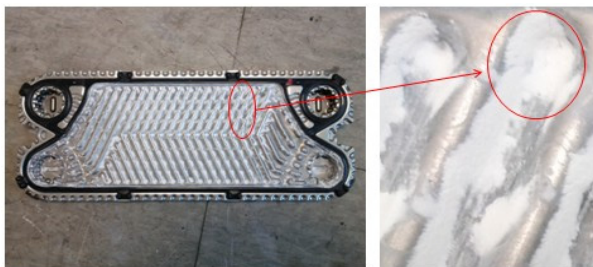
$$R_{ov} = R_0 + R_{f,0} + R_t + R_i + R_{f,i} \quad (1)$$

$$R_{f,o} = \frac{1}{U_{fouled}} - \frac{1}{U_{cleaned}}$$

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 열교환기 파울링 성능

파울링 인공 분말을 주입하면서, 탁도와 전열성능이 포화될 때까지 운전을 하였다. CaCO<sub>3</sub> 4.5 kg/m<sup>3</sup>을 주입



(a) Plate heat exchanger



(b) Shell and coil heat exchanger

Fig. 3 Fouled heat exchangers.

하여,<sup>(2)</sup> 탁도 5,000 NTU까지 포화됨을 확인 할 수 있었으며, 열저항 값이 포화됨을 확인 할 수 있었다. Fig. 3은 파울링 형상을 관찰하기 위해 가스켓 타입의 판형 열교환기와 원통 코일형 열교환기를 18,000분 동안 운전하고 분해한 사진이다. 판형 열교환기에는 분말이 전열관의 끝부분에 간헐적으로 침전되는 형상이 관찰되었으나, 원통 코일형 열교환기에는 코일의 Fin과 Fin사이 끝마다 일정한 침전량이 발생되며, 일부 구간에는 침전량이 끝높이까지 진행되어 있어 전열면적의 감소가 예상된다. 외부 원통에도 파울링이 형성됨을 확인 할 수 있었다.

Fig. 4는 시간에 따른 원통 코일형 열교환기와 판형 열교환기의 파울링에 따른 열저항 증가를 나타내고 있다. 물 측 유량 3,000 kg/h에서는 빠른 유속에 의해 입자의 침전이 늦어지며, 판형 열교환기의 일부 구간에서 판 사이 파울링 탈착이 발생된다. 유량 1,000 kg/h에서는 코일과 판 사이에서 접촉 시간이 길어져 파울링의 성장이 가속되고, 18,000분 이내에 포화된다. 원통 코일형 열교환기는 저유량 1,000 kg/h 조건에서 파울링 저항 0.000483 m<sup>2</sup>K/W 값에서 포화되며, 판형 열교환기 0.000213 m<sup>2</sup>K/W 값보다 120% 큰 값을 가진다.

Fig. 5는 물측 유량 1,000 kg/h 조건에서 원통 코일형 열교환기와 판형 열교환기의 파울링 저항 증가에 따른 열전달량 감소율을 나타내었다. 열전달량 감소율(Q<sub>ratio</sub>)은 식(2)와 같이 정의된다.

$$Q_{ratio} = 1 - \frac{Q}{Q_0} \quad (2)$$

열교환기 형상에 따라 파울링 저항에 따른 열전달량 감소율은 상이한 경향을 보인다. 원통 코일형 열교환기는 시간 경과에 따른 급격한 파울링 저항의 증가를 보이지만, 20,000분 기준 열전달량 감소율은 판형 열교환

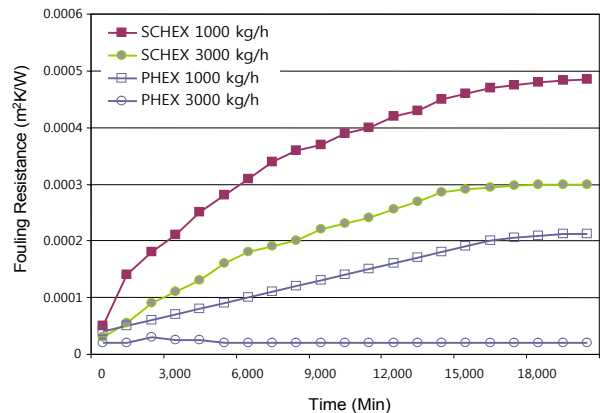


Fig. 4 Fouling resistance with time.

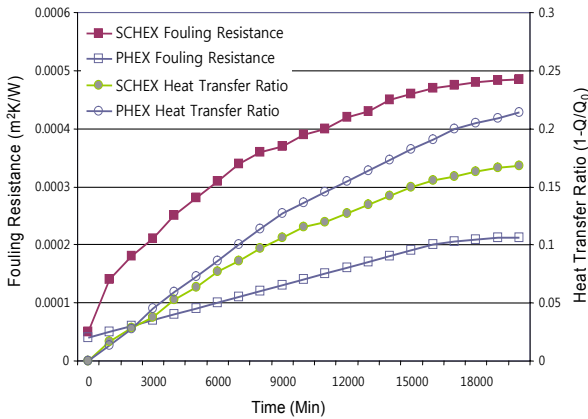


Fig. 5 Effect of fouling resistance with heat transfer ratio.

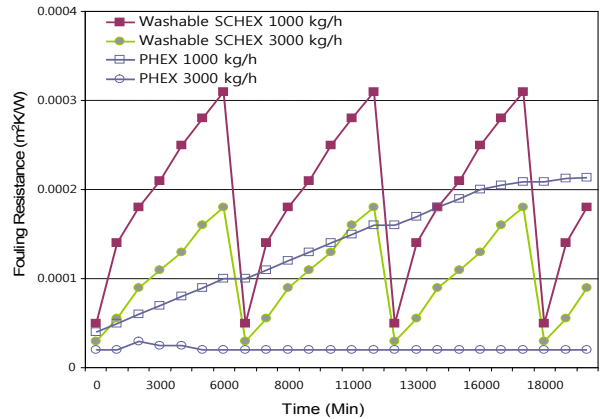


Fig. 7 Fouling resistance in the washable shell and coil heat exchanger.

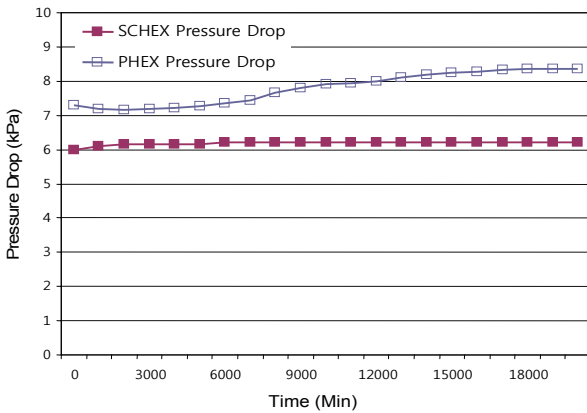


Fig. 6 Pressure drop with fouling.

기 0.21 대비 0.17의 값을 가지면서 약 4%의 차이가 발생한다. 이는 원통 열교환기의 구조상 원통 내부면과 코일의 Fin 사이의 파울링 침전에도 불구하고, 원통 내부의 코일 형상에 따른 유체와의 유효 전열 면적이 일정하게 유지되어, 파울링에 의한 전체 열저항의 증가폭이 상대적으로 작다는 것을 의미한다. 판형 열교환기는 상대적으로 작은 파울링 저항을 가지지만, 판과 판사이의 파울링 증가가 유로 감소와 유효 전열 면적에 직접적인 영향을 주면서, 더욱 큰 열전달량 감소폭을 나타내었다. Fig. 6에서는 파울링이 증가되면서 열교환기 내부의 압력강하의 변동 추이를 나타낸 그림이다. 원통 코일형 열교환기는 파울링에 의한 유동 감소폭이 미미하여, 압력강하의 변동폭이 적었으나, 판형 열교환기는 기동시 유로가 확장되면서 압력 강하는 순간 감소하는 경향을 보이지만, 파울링이 침전되면서, 판의 유효 전열 면적이 감소되고, 20,000분 운전 기준 원통 코일형 열교환기 대비 34% 큰 압력 강하값을 가진다. 판형 열교환기의 파울링에 의한 유효 전열 면적

의 감소는 물측 순환 양정의 증가와 유량의 감소를 가져오며, 열전달량의 감소에도 불구하고, 열전달율의 감소폭보다 물측 유량 감소폭의 영향도가 커지고, 증발기 사용 조건에서는 물측 입출수 온도차가 증가하게 되어, 출수 온도의 빙점 온도 이하 조건으로 인한 동파에 대비한 안전 운전이 필요하다.

### 3.2 세척 후 열교환기 파울링 성능 특성

Fig. 7은 원통 코일형 열교환기에서 원통을 분리하고, 물로 물리적 세척을 진행 한 이후의 열교환기의 파울링 저항 특성을 표시하였다. 분리 되지 못하는 브레이징 타입의 판형 열교환기는 세척이 불가하나, 원통 코일형 열교환기는 원통이 분리되어 파울링이 진행되는 원통 내벽과 코일의 핀 사이를 청소 솔과 고압수를 이용하여 물리적인 청소가 가능하다. 세척이 완료된 원통 코일형 열교환기는 초기의 파울링 저항값과 같은 값을 가지며, 6,000분 세척 주기를 통해 톱니바퀴와 같은 모양의 파울링저항이 증가되고 다시 회복되는 특성을 가진다. 파울링의 가속이 증가되는 저유량 1,000 kg/h 조건에서는 18,000분 이후에 세척을 통해 평균 파울링 열저항값이  $0.000203 \text{ m}^2\text{K/W}$ 으로, 판형 열교환기의 파울링 열저항값  $0.000213 \text{ m}^2\text{K/W}$  이하로 관리될 수 있다. 냉매 유량 1,000 kg/h 조건에서, 원통 코일형 열교환기는 물리적인 세척과 정기적인 보수를 통해 판형 열교환기와 동등 이하의 파울링 열저항값을 유지 할 수 있으며, 이는 수질이 악화되는 일부 지역에서 시스템의 성능과 신뢰성을 위해 더욱 적합한 열교환기라고 판단된다.

### 3.3 파울링 열저항 경험식

열교환기의 형태와 유속에 따른 시간 추이에 대한

파울링 열저항 증가에 대한 경험식을 이용하여, 현장에서 성능 저하를 미리 예측하고 수열원 히트펌프에서의 유지보수 주기를 결정할 수 있는 기준으로 활용할 수 있다.

Fig. 8은 식(3)과 같이 판형열교환기에서 Kern and Seaton Model<sup>(3)</sup>이 제시한 열저항 경험식을 동일한 유속조건 0.4 m/s 기준으로, 본 실험의 판형열교환기와 원통 코일형 열교환기에 적용한 결과이다.

$$R_f = R_f^* \times (1 - e^{-\frac{t}{t_0}}) \quad (3)$$

Kern and Seaton Model과 본 실험에서 예측된 경험식에서의 차이는 Kern and Seaton Model에서는 15장으로 된 가스켓 타입 판형 열교환기를 기준으로 수행되어, 본 실험에서의 45장의 브레이징 타입의 판형열교환기보다 판내 유속은 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 이로 인해 더욱 작은 포화 파울링 열저항값과 작은 시정수값을 가진다. 본 연구에서 진행된 판형 열교환기와 원통 열교환기에 대해, 포화 열저항 값과 시정수를 Table 3에 나타내었다.

이는 Thonon et al.<sup>(3)</sup>이 판형 열교환기 기준으로 유속 증가에 따른 유동 영향으로 인해 파울링 저항이 감소한다는 경향과도 일치한다. 원통 코일형 열교환기는 파울링이 쉽게 코일 외부 핀 표면에 부착되는 구조로 인

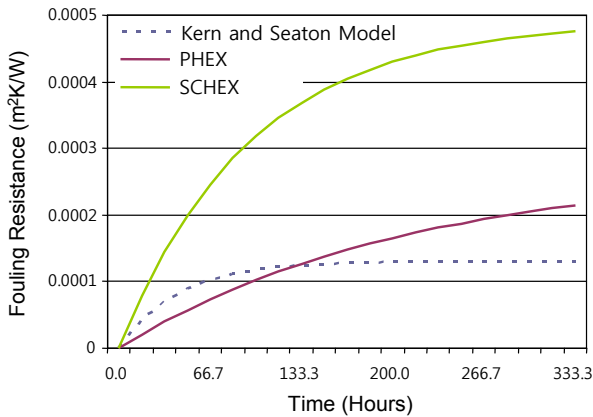


Fig. 8 Fouling resistance regression plot based on the Kern and Seaton model.

Table 3 Regression results

Parameters	R×f	t0
Kern and Seaton Model	1.31×10 <sup>-4</sup>	43.7
Plate Heat Exchanger	2.69×10 <sup>-4</sup>	209.0
Shell and Coil Heat Exchanger	4.91×10 <sup>-4</sup>	95.9

해, 초기 파울링 저항의 값은 상대적으로 크고, 포화되는 파울링 열저항값도 크다. 파울링 열저항의 세정 주기를 결정할 수 있는 열저항 시정수 값은 가스켓 타입 판형 열교환기와 브레이징 타입 판형 열교환기의 중간적인 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 열교환기의 파울링 열저항을 고려한 현장에서, 파울링을 개선하기 위한 세정 주기 시간을 결정하고자 할 때, 원통 코일형 열교환기가 물리적 세정이 가능한 가스켓 판형 열교환기보다 보다 2.2배 주기를 가질 수 있음을 의미한다. 가스켓 판형 열교환기가 대체로 일반 설비 현장에서 1회/년 세정 운영된다고 볼 때, 원통 코일형 열교환기는 약 2년에 1회의 세정주기가 예상된다. 본 결과를 통해 다른 열량과 형태의 열교환기의 검토시 시간과 파울링에 의한 열저항의 변화 추이를 검토함으로써, 세정 주기 시간을 정량적으로 결정하여, 동일 열량 기준 적합한 열교환기 형태를 결정해야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 원통과 코일이 분리 가능하여 세척이 용이한 원통 코일형 열교환기와 판형 열교환기의 열저항 특성을 비교하고, 파울링 열저항 증가 특성 및 세척 이후 파울링 열저항의 변화 특성을 평가하였다.

- (1) 저유속 조건에서 파울링은 접촉 시간과 비례하여 가속되며, 원통 코일형 열교환기는 판형 열교환기보다 120% 큰 파울링 열저항에서 포화된다. 하지만, 원통 코일형의 유효 전열 면적 감소폭이나 압력강하 값은 판형 열교환기 대비 미미하여, 열교환량의 감소 폭은 판형 열교환기 대비 약 4%정도 우수하다.
- (2) 원통 코일형 열교환기는 물리적 세척을 통해 틈나바퀴 모양의 증가되고 초기화 되는 파울링 열저항 특성이 나타나며, 판형 열교환기의 파울링 열저항과 동등 이하로 관리가 가능하다.
- (3) 파울링 열저항 경험식을 활용하여, 기존의 세척이 가능한 가스켓 타입 판형 열교환기와 파울링 시정수를 비교함으로써, 원통 코일형 열교환기의 세정 주기의 특성을 예측하였다.

본 연구를 통해 파울링에 의한 열교환기의 성능 저하를 원통 코일형 열교환기의 주기적인 세척을 통해, 시스템의 초기 성능을 유지할 수 있음을 확인하였다. 앞으로 현장에서의 검증을 통해, 파울링의 가속 조건이 실제 제품의 성능에 미치는 영향도를 평가할 예정이다.

#### References

1. Sung, S. K., Suh, S. H., and Roh, H. W., 2004, Analysis of fouling mechanism using visualization techni-

- ques in a lab-scale plate type heat exchanging system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 349-354.
2. Sung, S. K., Suh, S. H., and Roh, H. W., 2005, Cooling water fouling characteristics and physical water treatment in heat exchanging system, Proceedings of the KSME 2005 Spring Symposium, Vol. 5, pp. 2596-2601.
  3. 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. 13-25.
  4. Inoue, N., Iku, S., and Watanabe, K., 2012, Pressure drop and heat transfer inside the coiled flow channel of smooth tubes and internally helical-grooved tubes, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 20, No. 4, pp. 1250023.1-1250023.14.
  5. Seara, J. F., Uhla, F. J., Sieres, J., and Campo, A., 2007, A general review of the Wilson plot method and its modifications to determine convection coefficients in heat exchange devices, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, No. 17/18, pp. 2745-2757.
  6. Bansal, B., Steinhagen, H. M. and Chen, X. D., 2001, Comparison of crystallization fouling in plate and double-pipe heat exchangers, Heat Transfer Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 13-25.