

해수 파울링이 판형 열교환기 성능에 미치는 영향에 대한 고찰

Study on Effects of Seawater Fouling on a Plate-Frame Heat Exchanger

허재혁(Jaehyeok Heo)¹, 이동원(Dong-Won Lee)¹, 김민휘(Min-Hwi Kim)¹, 백원근(Wonkeun Baik)², 윤 린(Rin Yun)^{2†}

¹한국에너지기술연구원, ²한밭대학교 기계공학과

¹Solar Thermal Group, New and Renewable Energy, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, 34129, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

(Received January 9, 2017; revision received March 24, 2017; Accepted: March 27, 2017)

Abstract Understanding of seawater fouling characteristics is critical in designing a heat exchanger adapted in an effluent utilization system for a power plant. We reviewed three types of fouling mechanisms of general, biological, and crystallizing for a plate-frame heat exchanger, to be used for heat exchanging with heated effluent from a power plant. Also, mathematical models for each type of seawater fouling were suggested. Actual thermal resistance calculated from seawater fouling models were compared and implemented in designing a plate-frame heat exchanger. The bio-fouling model revealed the largest thermal resistance and the highest number of plates for a plate-frame heat exchanger under the same heat load. Overall heat transfer coefficient and pressure drop of a plate-frame heat exchanger under fouling conditions was lower by 58 percent and higher by 2.85 times than those under clean conditions, respectively.

Key words Sea water(해수), Fouling(파울링), Plate-Frame Heat exchanger(판형 열교환기), Crystallization(결정화), Bio fouling(바이오 파울링)

† Corresponding author, E-mail: yunrin@hanbat.ac.kr

기호설명

A : 열교환기 면적 [m^2]
 C : 상수
 D : 지름 [m]
 f : 마찰계수
 G : 질량유속 [kg/m^2s]
 g : 중력가속도 [m/s^2]
 h : 대류열전달계수 [W/m^2K]
 K : 바이오필름의 선형성장률
 K_p : 상수
 k_d : 동적 파울링의 퇴적율, 1/hr
 k_r : 동적 파울링의 동적 제거율
 L_v : 수직방향 포트 간격 [m]
 M₀ : 해수 내 파울링 이온들의 초기 질량 [g/liter]
 M_{a,max} : 퇴적 후 활동생물의 최대 질량 [mg/cm^2]
 M_{a,0} : 퇴적 후 활동생물의 초기 질량 [mg/cm^2]
 m : 열교환기 표면의 퇴적량 [kg]
 N_p : 열교환기 패스 수

Nu : Nusselt 수
 R : 파울링의 열저항 [m^2K/W]
 R_d : 바이오필름의 지연률
 Re : 레이놀즈 수
 Pr : Prandtl 수
 S : 이온들의 용해도 [mg/liter]
 T_{lmid} : 대수평균 온도차 [K]
 t : 시간 [h], 열교환기 판 두께 [m]
 U : 총괄열전달계수 [W/m^2K]
 Vol : 열교환기 내 유로 체적 [m^3]
 x : 파울링의 두께 [m]
 β : 웨브론 각도 [degree]
 λ : 파울링의 열전도계수 [W/mK]
 μ₀ : 바이오 파울링의 최대 성장률 [1/hr]
 μ : 점성계수 [$Pa \cdot s$]
 ρ : 파울링의 밀도 [kg/m^3]

하첨자

a : 퇴적 후 바이오활동

b	: bulk 측	HX	: 열교환기
c	: 관형 열교환기 채널측, 청정, 냉수 측	p	: 관형 열교환기 포트 측
d	: 퇴적	r	: 제거
e	: 등가	0	: 초기
f	: 파울링	w	: 벽면
h	: 온수 측	∞	: 무한시간

1. 서 론

국제적으로 발전소 온배수에 대한 다각적인 활용방안이 추진되어 있으며, 국내의 경우 양식업과 농업에 극히 일부를 활용할 뿐 대부분 바다에 방류되고 있다. 국내 발전소 온배수는 연간 약 480억 톤에 이르며 이용가능한 난방에너지는 연간 465,182 Tcal로 예측되고 있다.⁽¹⁾ 발전소 온배수 열은 2014년 8대 에너지 신산업, 2015년 신재생에너지에 포함됨에 따라 관련 산업의 성장이 기대되며, 효율적이고 안정적인 이용을 위한 관련 기술개발이 필요한 실정이다.

발전소 온배수 이용 기술은 크게 취수, 이송, 에너지 공급 등으로 나뉘며, 발전소 냉각계통과의 연계 및 고집적 열회수를 위한 기술개발이 중요하다. 온배수는 일반 해수에 비해 약 5~8℃가 높으며, 파울링 특성을 고려하여 안정적이면서 대용량의 열회수가 가능한 해수-물 열교환기 시스템 설계가 중요한 기술 중 하나이다.

열교환기 파울링과 관련한 연구로서 Chae 등은⁽²⁾ 물을 이용한 열교환기에서 주요오염인인 탄산칼슘(CaCO₃)을 인위적으로 이중관 열교환기 내부로 순환시켜 오염생성에 따른 열교환기 성능변화를 고찰하였다. 총괄열전달 계수는 오염농도가 증가할수록 감소하였고, 탄산칼슘을 이용한 오염의 경우 고온에서 제거가 어려운 결정성 오염으로 변하고, 농도가 짙을수록 결정성 오염이 증가하여 세정능력이 감소되는 것으로 나타났다. Sung 등은⁽³⁾ 실험실용 열교환 시스템을 제작하고 미활용에너지로 하천수를 이용할 때의 파울링 형성에 관한 연구를 수행했다. 시수(Tap water)에서 생성된 파울링은 방해석(calcite) 형태의 탄산칼슘이고 하천수의 경우는 선석(aragonite) 형태의 탄산칼슘임을 밝혔다. Hwang 등은⁽⁴⁾ 관형 열교환기의 시간의 경과에 따른 탄산칼슘(CaCO₃) 파울링 실험을 통하여 관형 열교환기에서의 형상 및 설계변수에 따른 파울링 형성을 고찰하였는데, 파울링은 시간이 지남에 따라서 증가하다 일정 수준에 수렴하는 경향을 보이며 탄산칼슘(CaCO₃) 농도의 증가에 따라서 파울링 저항계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 유량이 증가할수록 파울링 저항계수가 작아지는 경향을 나타내었으며, 유량 증가에 따라 파울링 생성 지연효과가 나타났다. Jeon 등은⁽⁵⁾ 온수가열시스템에 적용되는 관형 열교환기 내 파울링이 열전달특성에 미치는 영향을 다양한 운전조건에서 실험을 통해 연구하였다. 오염원으로는 CaCO₃를 활용하였고, 유량의 감소에 따라, 세브론 각도와 농도의 증가에 따라 파울링 열저항이 증가함을 보였다. Nebot⁽⁶⁾ 등은 해수 파울링 모델 검증을 위해 헬-튜브 열교환기 티타늄 및 알루미늄 합금 대상으로 파울링을 시험하였다. Yang⁽⁷⁾ 등은 구리 및 스테인리스 막대를 대상으로 해수 파울링 시험을 진행하고, 표면 온도 및 속도의 영향을 고찰하였다. 현재까지의 연구를 살펴볼 때 해수에 적용 가능한 가스켓 방식 관형 열교환기에 대한 파울링 종류, 파울링 메카니즘, 그리고 관련 모델에 대한 연구는 매우 희소함을 볼 수 있었고 이를 고려한 열교환기 설계를 찾아보기 어렵다.

이에 본 연구에서는 발전소 온배수용 열교환기 해석 및 성능예측과 기술을 확보하기 위해 해수 파울링의 종류 및 해수 파울링 생성 메카니즘을 파악하고, 본 적용에 적합한 기존 해수 파울링의 수학적 모델링을 선정하여 관형 열교환기의 설계 및 성능에 미치는 영향을 고찰하고자한다.

2. 연구 방법

2.1 해수 파울링의 종류

2.1.1 입자에 의한 퇴적파울링

해수의 경우 많은 종류의 silt, 진흙, 모래, 다른 매우 잘게 분쇄된 입자들이 열교환기 표면에 쌓여서 하나의 파울링 층을 형성하게 된다.

Table 1 Types and concentration of salt in seawater

Components	Cl ⁻	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺
Concentration(mg/L)	18,980	10,560	2,560	1,272

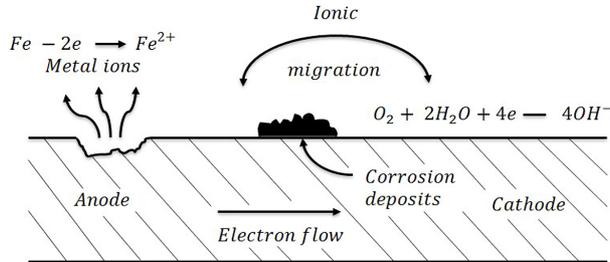


Fig. 1 Schematics for the corrosion fouling mechanism.

2.1.2 결정에 의한 파울링

해수에는 Table 1에 나타난 바와 같이 Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺, 그리고 Al³⁺와 같은 다량의 무기질 염이 존재하게 되는데 이 무기질염이 해수조건에 따라 포화상태를 지나 결정(crystal)을 생성하게 된다. 이 같은 결정생성이 열교환기 표면에서 발생하는 경우 이를 결정화 파울링이라고 한다. 결정화 파울링의 생성은 3가지 단계를 갖는데, 무기질 염에 의한 과포화 상태, 결정핵의 생성 및 결정화, 결정의 성장으로 구분할 수 있다.

2.1.3 부식에 의한 파울링

Fig. 1은⁽⁸⁾ 금속표면에서 발생하는 부식(corrosion)에 대한 개념을 나타낸다. 식(1)과 같이 금속표면에서 철이온의 이탈은 금속 내부에는 잉여의 전자를 남기고 이는 금속내부로 이동하여 식(2)에 나타난 바와 같이 용해된 산소와 물과 만나 하이드록실(hydroxyl) 이온을 형성하게 된다. 최종 용해된 철이온과 하이드록실 이온이 만나 열교환기 표면에서 산화되어 녹(Fe(OH)₃)이 형성되고 표면에 쌓이게 된다. 전체 산화/환원식을 정리하면 식(3)과 같다. 이와 같은 부식의 경우 금속과 접하는 유체의 pH 농도에 큰 영향을 받는데 해수의 경우 약알칼리(평균 pH = 8)에 속하고 이 경우에는 가장 낮은 부식율을 나타낸다. 부식에 의한 파울링은 해수의 온도에도 영향을 받는데 해수의 온도가 증가할수록 산소(Oxygen)의 용해도가 낮아지기 때문에 부식에 의한 파울링은 현저하게 감소한다.



2.1.4 바이오 파울링

바이오 파울링을 일으키는 생물들은 미생물체에서는 박테리아, 엘지, 균류가 있고 매크로생명체에서는 홍합류, 따개비류, 미역류와 말미잘 등이 있는데, Hamilton과 Characklis는 바이오 필름의 형성에 Fig. 2에 나타난 각 단계를 제시했다.⁽⁹⁾ 첫 번째 단계는 잠재 또는 시작 단계로, 표면에 큰 분자의 생물 서식 조건이 가능한 필름을 형성하면 표면으로 미생물이 이동하고 고체-유체 표면간의 세포의 부착을 한다. 다음 단계는 가속 성장 단계인데, 초기에 부착된 매우 작은 서식지의 급격한 증가가 이루어지며 미생물이 소비하는 양분보다 충분한 양분이 존재하기 때문이다. 그 다음은 선형 축적 단계로, 바이오파울링의 축적이 일정한 비율로 이루어진다. 이 단계의 특징은 높은 단백질들과 다당류(polysaccharide) 생성율이 증가하며 출구부근에서의 일정한 양분 농도를 갖고 일정한 산소를 소비한다. 마지막 단계는 안정화 및 탈착 단계인데, 최종적으로 지지대에 미생물의 포화현상으로 성장을 방해하는 요인들(세포간의 밀도와 독성의 축적)과 일부 오래된 축적물들이 떨어져 나가는 현상과 평형을 이루어 안정화를 이루게 된다.

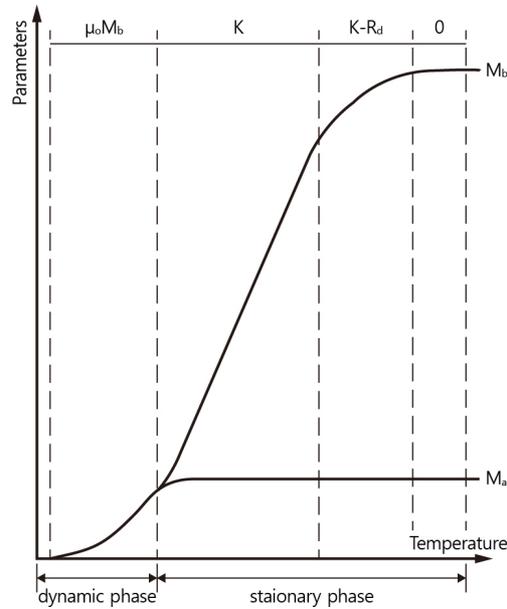


Fig. 2 Growing steps for bio-fouling mechanism.

2.2 해수 파울링의 수학적 모델

파울링의 일반적인 모델링은 Kern과 Seaton이⁽⁸⁾ 최초 제시한 아래의 단순모델을 기반으로 하고 있다.

식(4)는 파울링 퇴적물의 시간의 따른 변화량은 시간에 따라 퇴적층에 퇴적되는 양(m_d)와 시간에 따라 퇴적층에서 제거되는 양(m_r)을 뺀 양과 같다는 물리적 의미를 말해준다. 이 식을 통해 식(5)와 같은 파울링에 의한 열저항 관계식을 얻을 수 있다. 즉, 파울링에 의한 열저항은 시간에 따라 최종 $R_{f\infty}$ 에 접근해 가며 그 접근 기울기는 k 값에 의해 결정된다.

이 식은 실험결과를 통해 측정된 값을 비교적 쉽게 활용가능하다는 점에 있어서 큰 장점이 있다. 이 같은 파울링 열저항의 점진적 변화경향은 시간에 따라 퇴적층 내 퇴적량과 제거량이 평형을 이룬다는 가정 하에 가능한 것인데, 초기 급격한 퇴적층의 성장 이후에 퇴적층의 증가에 따라 여러 가지 요인들에 의해서 제거량의 증가를 가져오고 결국 두 변수가 평형을 이루게 된다는 여러 실험을 통해 얻어진 결과라 할 수 있다. 식(6)은 해수를 이용한 열교환기의 파울링에 대해서 Nebot 등이⁽⁶⁾ 제시한 보다 개선된 파울링 열저항 식으로 열교환기 설계 모델에 적용이 가능한 파울링 모델로서 적합하리라 판단된다. 본 연구에서는 k 값으로 $0.542 \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K} \cdot \text{day})$ 를 $R_{f\infty}$ 는 $0.346 \text{ m}^2\text{K}/\text{KW}$ 를 사용하였다.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm_d}{dt} - \frac{dm_r}{dt} \tag{4}$$

$$R_f = R_{f\infty} (1 - e^{-k \cdot t}) \tag{5}$$

$$R_f = \frac{R_{f\infty}}{1 + \left[\frac{R_{f\infty}}{R_{f0}} - 1 \right] \times e^{-kR_{f\infty}t}} \tag{6}$$

$$M_{bio} = \mu_0 (M_a)_{\max} \times t + (M_a)_{\max} \left[\ln \frac{(M_a)_0}{(M_a)_{\max}} + 1 \right] \tag{7}$$

$$M_{bio} = \rho_f x_f = \rho_f \lambda_f R_f \quad (8)$$

바이오 파울링에 대한 수학적모델링은 식(7)과 같다.⁽⁹⁾

Melo 등은⁽¹⁰⁾ 실제 측정값을 바탕으로 μ_0 는 0.16 1/hr, $M_{a,max}$ 는 $61.3 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$, 그리고 $M_{a,0}$ 로서 $3.2 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ 값을 제시하였다. 식(8)은 단위 면적당 퇴적량, M_{bio} 와 파울링 열저항사이의 관계를 나타낸다. 실제 열교환기 설계에 있어서 파울링 열저항이 활용되기 때문에 식(8)의 이용을 위해서는 정확한 퇴적물의 밀도 및 열전도계수는 반드시 필요하다.

$$m_{crystallization} = \frac{(M_0 - S)k_d}{k_r - k_d} (e^{-k_d t} - e^{-k_r t}) \times \frac{Vol_{HX}}{Area_{HX}} \quad (9)$$

$$m_{crystallization} = \rho_f x_f = \rho_f \lambda_f R_f \quad (10)$$

Yang이⁽⁷⁾ 제시한 결정화 파울링의 모델링은 식(9)와 같다.

본 연구에서 M_0 는 3.57 g/liter를 S 는 0.4 mg/liter를 활용하였다. k_d 와 k_r 은 해수의 온도와 속도에 따라 달라지고 그 범위는 k_d 의 경우 $2.8 \times 10^{-5} \text{ 1/hr}$ - $4.5 \times 10^{-5} \text{ 1/hr}$ 이고 k_r 의 경우 2×10^{-6} - 8×10^{-6} 에 해당한다.

식(10)은 상기 수학적 모델을 통해 계산된 퇴적량, $m_{crystallization}$ 을 이용하여 실제 파울링 열저항 R_f 를 산출하는 식이다. 본 연구에서 파울링의 열전도계수는 $0.542 \text{ W/m}^2\text{K}$ 을 밀도는 800 kg/m^3 을 이용하였다.⁽¹¹⁾

2.3 파울링을 고려한 판형 열교환기 모델링

Fig. 3은 본 연구에서 적용한 판형 열교환기 내 판의 형상 및 크기를 나타내고 Table 2에 구체적인 치수를 나타냈다. Fig. 4는 상기 파울링 모델을 적용한 판형 열교환기의 총괄 해석 순서도를 나타낸다. 본 해석에서 작동유체의 열역학적 및 전달물성은 EES(Engineering Equation Solver)를 이용하여 계산하였다. Table 3은 각각 열교환 작동유체의 열교환기 입·출구 온도와 유량을 나타내는데, 순서도에 나타난 입력 값으로 활용되었다. 이와 같은 정보를 바탕으로 본 열교환기의 열전달해석 및 압력강하해석을 다음과 같이 수행하였다.

본 열교환기의 열 해석은 식(11)과 같이 대수평균온도차(LMTD) 방식을 이용하여 진행하였고, LMTD는 식(12)와 같이 대향류 열교환기를 기준으로 정의하였다. 총괄 열전달계수는 파울링이 없는 경우와 파울링의 영향이 있는 경우로 구분하여 각각 U_c 그리고 U_f 로 나타내었으며 그 관계는 식(13) 및 식(14)와 같다. 식(13)에서의 R_n 는 총 파울링저항을 말하는데, 일반적으로 파울링이 열교환기 튜브 혹은 판의 안과 바깥 모두에 생성되기 때문이다. 본 열교환기의 Nusselt는 식(15)를 이용해 계산하였고 식(15)의 C_h 와 n 값은 열교환기의 β 값에 따라 적용했다.⁽¹²⁾ 식(15)를 이용해 구한 Nusselt 수를 대입해 h_c 와 h_h 를 계산한 후, 식(13)과 식(14)를 이용해 U_f 와 U_c 를 계산해 최종적으로 식(11)에 있는 판형 열교환기의 면적을 도출해냈다.

Table 2 Details for a plate-frame heat exchanger

Specifications for a plate	values	units
Vertical port length, L_v	1.8	m
Horizontal port width, L_h	0.58	m
Port diameter, D_p	200	mm
Channel spacing	3	mm
Chevron angle	25	degree
Plate thickness	0.5	mm
Number of pass	1	
Material	Titanium	

Table 3 Specifications for hot and cold working fluids

	Parameters	Value	Units
Hot side	Inlet Temp.	295.15	K
	Outlet Temp.	290.15	K
	Flow rate	134042.5	kg/hr
	Fluid	Sea water	Salinity : 35[g/kg]
Cold side	Inlet Temp.	286.15	K
	Outlet Temp	293.15	K
	Fluid	water	

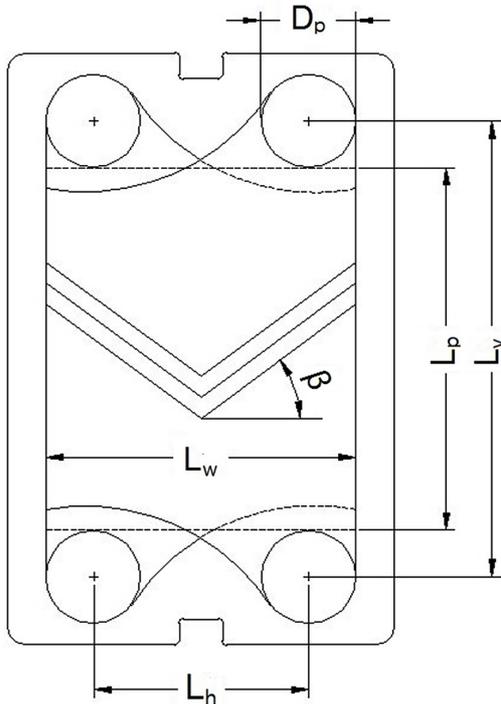


Fig. 3 Dimension of plate in a gasket type plate-frame heat exchanger.

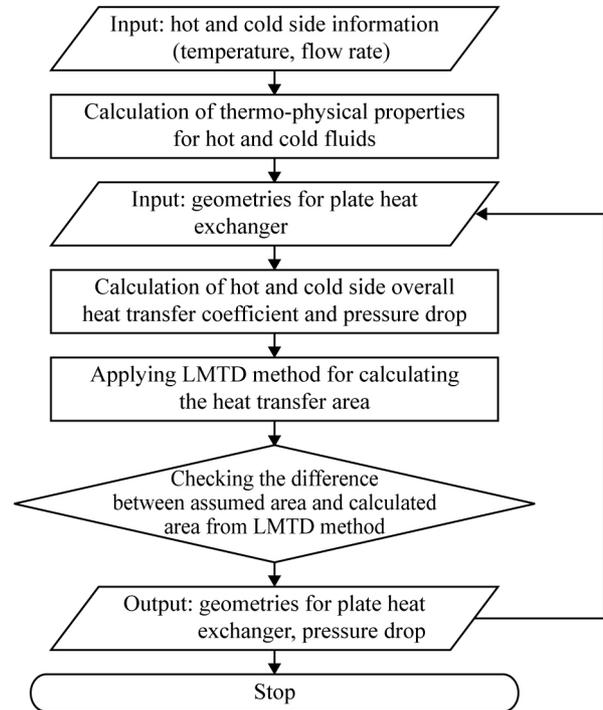


Fig. 4 Flow chart for heat exchanger design.

$$Q = UA T_{lmtd} \tag{11}$$

$$T_{lmtd} = \frac{(T_{h, inlet} - T_{c, outlet}) - (T_{h, outlet} - T_{c, inlet})}{\ln\left(\frac{T_{h, inlet} - T_{c, outlet}}{T_{h, outlet} - T_{c, inlet}}\right)} \tag{12}$$

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c} + \frac{t}{\lambda_w} + R_{fh} + R_{fc} \tag{13}$$

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_c} + \frac{t}{\lambda_w} \tag{14}$$

$$Nu = C_h Re^n Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.17} \tag{15}$$

$$\Delta P = \frac{2f L_V N_p G_c^2}{\rho D_e} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{-0.17} + 1.4 N_p \frac{G_p^2}{2\rho} + \rho g L_V \tag{16}$$

$$f = \frac{K_p}{Re^m} \tag{17}$$

파울링에 의한 압력강하의 변화는 파울링 퇴적층에 의한 열전달 유로의 감소와 표면을 거칠게 하는 이유로 증가한다. 식(16)은 판형 열교환기 내 압력강하 상관식으로 판형 열교환기의 판 및 판 입구부에서 발생하는 압력강하를 모두 나타낸다. 식(16)의 마찰계수 f 는 식(17)을 통해 산출하였다.

열전달 및 압력강하해석을 마친 다음에는 식(8)을 통해 열교환기 면적을 산출하게 되는데 이 값을 최초 가정된 열교환기 면적과 비교하게 된다. 이 값이 같아질 조건까지 최초 가정 열교환면적을 변경하게 되고 수렴 후 최종 열교환기 사양을 도출하게 된다. 본 판형 열교환기 모델은 Kakac과 Liu⁽¹²⁾가 제공한 기본형 판형 열교환기 설계결과와 일치함을 보였고, 본 연구에서 적용한 파울링 모델은 향후 실제 실증실험을 통해 보완될 예정이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해수 파울링에 따른 파울링 열저항의 변화

Fig. 5의 사각 심볼은 실험적 측정을 통해 제시하고 있는 바이오 파울링, 결정 파울링, 그리고 일반 해수 파울링의 퇴적량 혹은 열저항을 나타내고 있다. 그래프 내 실선은 본 판형 열교환기의 설계모델에 적용된 각 파울링 모델의 예측값을 나타내고 있다. 실험결과에 있어 파울링 퇴적물의 열전도계수 및 밀도가 정확하게 제시되어 있지 않아 오차가 발생하나 경향을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 확인 할 수 있다. Fig. 6은 시간에 따른 각 해당 파울링 모델의 열저항 결과를 나타낸다. 해당 파울링의 계산은 본 논문 제 2.2절에서 제시한 바와 같이 모델에 적용되는 계수들의 값에 따라 달라지며, 각 계수는 모두 발전소 적용 열교환기 및 해수적용 열교환기의 실험결과 값에 기반한 결과이다. 바이오 파울링과 결정화 파울링의 열저항은 시간에 따라 지속적인 증가를 나타내고 있고, 일반 파울링 모델의 경우 50일 이전에 $3.46 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ 로 수렴되어 일정 값을 가짐을 볼 수 있다. 본 적용 모델에 있어서 결정화 파울링의 열저항은 최대 $1.759 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$ 의 값을 나타낸다. 현재까지 바이오 파울링의 각 진행단계에 대한 소요기간을 예측할 수 있는 정확한 방법이 제시되어 있지 않아 본 연구에서는 해석기간 동안 선형축적단계라고 가정하여 해석을 진행하였다.

Fig. 7은 파울링 퇴적물의 밀도를 $800 \sim 1,200 \text{ kg/m}^3$ 로 변화시켰을 때 이에 따른 열저항과 파울링의 두께 변화를 나타낸다. Brahim 등의⁽¹¹⁾ 연구에 따르면 파울링의 밀도는 파울링 층의 두께에 따라 $200 \sim 1,600 \text{ kg/m}^3$ 의 넓은 범위로 변하고 있음을 확인할 수 있다. 식(8)에 나타난 바와 같이 파울링의 밀도가 증가함에 따라 파울링의 벽면두께가 작아지고 이에 따라 파울링 열저항이 크게 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 8은 바이오 파울링의 경우 μ_0 에 따른 파울링에 의한 열저항을 적용 시간에 따라 나타내고 있다. μ_0 는 해수 내 포함된 TOC(total oxygen carbonate)에 의해 결정되기 때문에 실제 모델의 적용에 있어서는 본 열교환기 적용 해당 해수 조건에 적합한 μ_0 를 사용해야 할 것이다. 열교환기 작동시간의 증가에 따라 μ_0 에 따른 열저항의 증가율이 증대되고 있다.

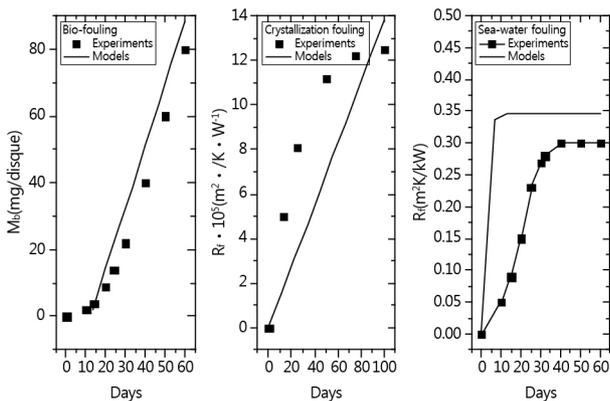


Fig. 5 Comparison between experimental fouling deposition and thermal resistance with the present applied fouling models.

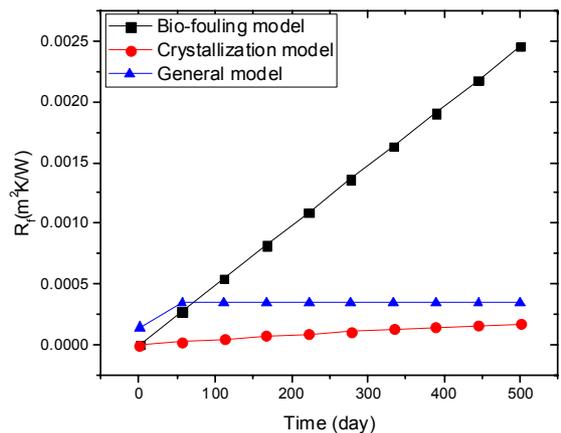


Fig. 6 Variation of fouling thermal resistance with operation time.

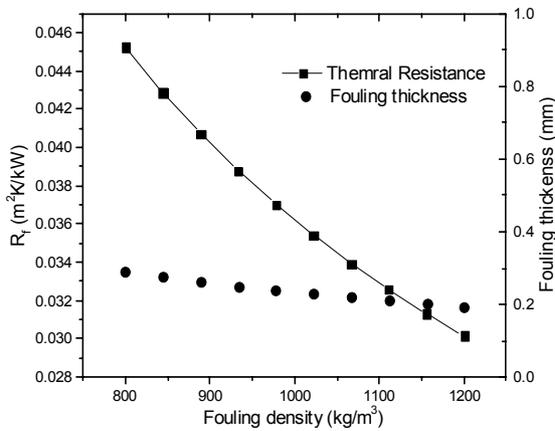


Fig. 7 Variation of fouling thickness and thermal resistance with density of foulant.

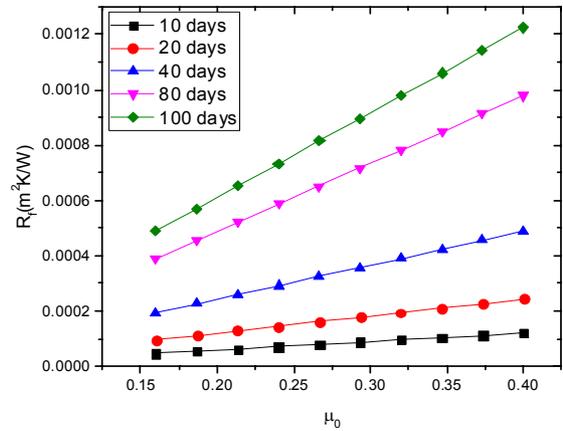


Fig. 8 Variation of bio-fouling thermal resistance with time and maximum growth rate of foulant.

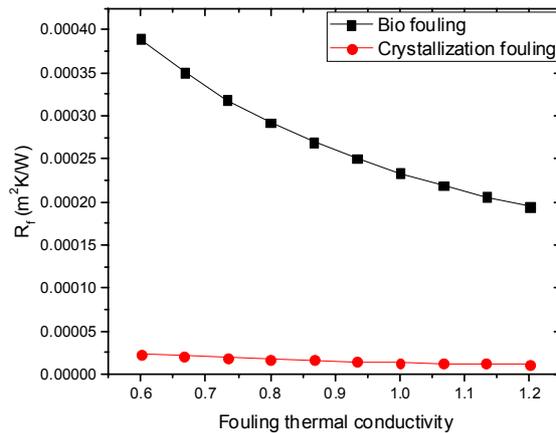


Fig. 9 Variation of fouling thermal resistance with foulant thermal conductivity.

퇴적물의 열전도계수도 파울링 재질 및 기공률에 따라 달라지므로 이에 따른 파울링 열저항의 변화를 Fig. 9에 나타냈다. 본 연구에서는 파울링의 열전도계수의 변화를 0.6~1.2 W/mK의 변화시켰다. 바이오 파울링과 결정화 파울링에 있어 절대값의 차이는 있으나 파울링의 열전도계수의 증가에 따라 열저항이 감소됨을 볼 수 있다.

3.2 해수 파울링에 따른 열교환기 성능변화

Fig. 10과 Fig. 11은 바이오 파울링 조건 및 청정조건에서 시간에 따른 총괄열전달계수 및 관형 열교환기의 판의 개수, 그리고 압력강하 변화를 나타낸다. 본 계산에 있어 바이오 파울링의 최대 성장률, μ_0 는 0.16 1/hr을⁽¹⁰⁾ 파울링의 열전도계수는 0.542 W/m²K를⁽¹¹⁾ 활용하였다. 운전시간이 0인 경우에는 모든 파울링 조건에서 판의 개수는 모두 102개로 동일하다.

파울링의 증가에 따라 최초 제시된 부하조건을 만족시키는 조건에서 설계되었기 때문에 판의 개수는 증가하고 이에 따라 각 판에 흐르는 유량의 감소로 압력강하도 감소하는 경향을 볼 수 있다. 150일 이후에는 압력강하가 다시 증가하는 경향을 보이는데, 이는 판의 개수 증가에 따른 유량 감소에 기인한 압력강하의 저하보다 지속적으로 증대된 파울링 두께에 증가에 따른 유속증대로 인한 압력강하가 더 크기 때문으로 판단된다. 바이오 파울링의 경우 운전시간에 따라 선형적 증가를 가정했기 때문에 R_f 의 증가에 따라 꾸준히 전열판의 개수가 비례하여 증가하였다.

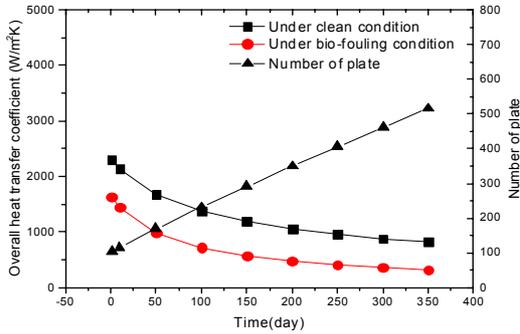


Fig. 10 Variation of overall heat transfer coefficient and number of plate with and without bio-fouling thermal resistance.

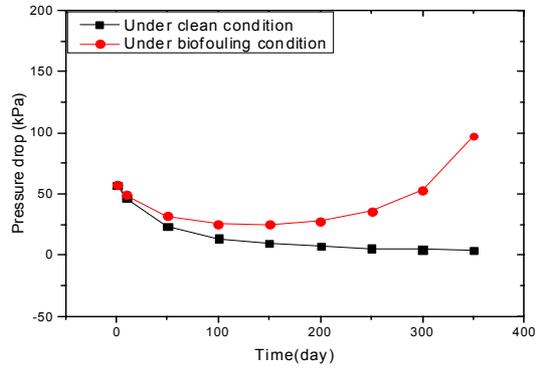


Fig. 11 Variation of pressure drop with and without bio-fouling thermal resistance.

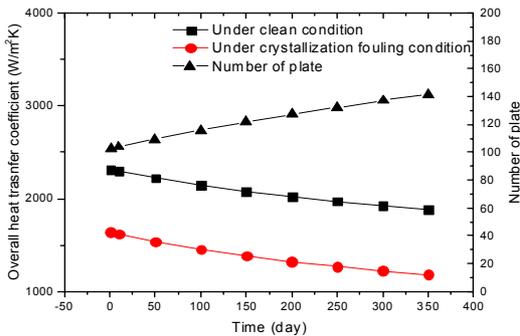


Fig. 12 Variation of overall heat transfer coefficient and number of plate with and without crystallization-fouling thermal resistance.

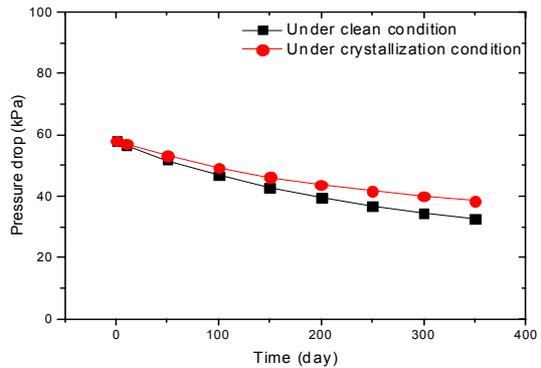


Fig. 13 Variation of pressure drop with and without crystallization-fouling thermal resistance.

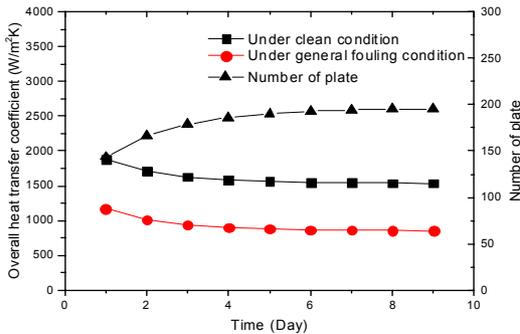


Fig. 14 Variation of overall heat transfer coefficient and number of plate with and without general fouling thermal resistance.

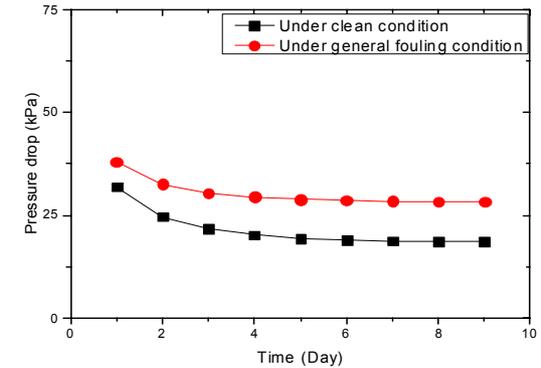


Fig. 15 Variation of pressure drop with and without general fouling thermal resistance.

Fig. 12와 Fig. 13은 결정 파울링 조건 및 청정조건에서 시간에 따른 총괄열전달계수 및 판형 열교환기의 판의 개수, 그리고 압력강하의 변화를 나타낸다. 결정화 파울링의 경우 그 절대적은 값은 다르나 열전달계수 및 판수의 변화에 있어 바이오 파울링과 동일한 변화를 보이고 있다. 다만, 바이오 파울링의 파울링 열저항에 비해서 절대적으로 작은 값을 나타내고 있어 압력강하에 있어서는 열교환기의 운전에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 나타낸다. Fig. 14와 Fig. 15는 일반 파울링 모델에서 파울링조건 및 청정조건에서 시간에 따른 총괄열전달계수 및 판의 개수, 그리고 압력강하의 변화를 나타낸다. 일반 파울링의 경우 10일 이후 파울링 열저항이 수렴하기 때문에 10일 운전까지 결과값을 나타냈고 그 경향은 결정화 파울링과 유사한 경향을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 발전소 온배수용 열교환기의 해석 및 성능예측 기술을 확보하기 위해 해수 파울링의 종류 및 해수 파울링 생성 메커니즘을 고려하여 해수 파울링의 수학적 모델을 선정하였고, 이를 적용하여 판형 열교환기의 성능해석을 수행하였다.

- (1) 판형 열교환기 적용 해수 파울링의 종류로는 크게 바이오 파울링과 결정화 파울링을 고려해 볼 수 있다.
- (2) 바이오 및 결정화 파울링의 경우 열교환기 운전시간에 비례하여 열저항이 증가하였고 바이오 파울링의 열저항은 결정화 파울링의 열저항에 비해 현저하게 크게 나타났다.
- (3) 파울링을 고려한 판형 열교환기의 총괄열전달계수는 청정조건에 비해서 평균 58%작게 나타났고, 압력강하는 평균 2.85배 크게 나타났다.
- (4) 실제 운전부하조건에서 열교환기를 설계할 때 장기운전시 발생하는 파울링효과를 고려하지 않고 설계할 경우 파울링 현상에 의해 매우 작은 용량의 열교환기가 될 수 있다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업(과제번호 : 20163010150010)의 연구지원과 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1A2A1A15055823).

References

1. Rural research institute, 2015, A Study on the application of thermal discharge from power plant in rural community, Report, pp. 37-38.
2. Chae, H., Cha, D., Kwon, O., and Kwon, J., 2014, The Cleaning Characteristics of Double pipe Heat exchanger according to the CaCO₃ Concentration, Proceedings of Winter Conference of SAREK, pp. 260-263.
3. Sung, S., Suh, S., and Roh, H., 2004, Analyses of Fouling Mechanism using visualization techniques in a Lab-scale Plate-type Heat exchanger System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 349-354.
4. Hwang, J., Na, B., Oh, S., Koo, K., Lee, J., and Ahn, Y., 2015, Fouling characteristics of washable shell and coil heat exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 27, No. 2, pp. 69-74.
5. Jeon, J., Lee, E., Kang, H., and Kim, Y., 2014, The fouling characteristics of plate heat exchangers with geometric and operating parameters, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 26, No. 4, pp. 163-168.
6. Nobot, E., Casanueva, J. F., Casanueva, T., and Sales, D., 2007, Model for fouling deposition on power plant steam condensers cooled with seawater; Effects of water velocity and tube material, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, No. 17-18, pp. 3351-3358.
7. Yang, D., Liu, J., Xiaoxue, E., and Jiang, L., 2016, Model for seawater fouling and effects of temperature, flow velocity and surface free energy on seawater fouling, Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 658-664.
8. Bott, T. R., Fouling of Heat Exchangers, 1995, Elsevier Science & Technology Books.
9. Belkhadir, R., Capdeville, B., and Roques, H., Fundamental descriptive study and modelization of Biological film Growth, 1998, Wat. Res., Vol. 22, No. 1, pp. 59-69.
10. Melo, L. F., Bott, T. R., Fletcher, M., Capdeville, B., 1992, Biofilms-Science and Technology, NATO ASI Series, Vol. 223, Springer Press.
11. Brahim, F., Augustin, W., and Bohnet, M., 2003, Numerical simulation of the fouling on structured heat transfer surfaces (fouling), Proceedings Heat exchanger Fouling and Cleaning : Fundamentals and Applications, <http://dc.engconntl.org/heatexchanger/17>.
12. Kakac, S. and Liu, H., Heat exchangers, SELECTION, RATING, and THERMAL DESIGN, 2nd Edition, CRC Press.