

다관원통형 열교환기의 파울링 해석기법 개발 연구

황 경 모[†] · 진 태 은^{*}

(2003년 7월 25일 접수, 2003년 12월 8일 심사완료)

A Study on the Development of Fouling Analysis Technique for Shell-and-Tube Heat Exchangers

Kyeong Mo Hwang and Tae Eun Jin

Key Words: Fouling Factor(오염계수), Residual Heat Removal Heat Exchanger(잔열제거 열교환기), Component Cooling Water Heat Exchanger(기기냉각수 열교환기), Overall Heat Transfer Coefficient(총괄열전달계수)

Abstract

Fouling of heat exchangers is generated by water-borne deposits, commonly known as foulants including particulate matter from the air, migrated corrosion products; silt, clays, and sand suspended in water; organic contaminants; and boron based deposits in plants. The fouling is known to interfere with normal flow characteristics and reduce thermal efficiencies of heat exchangers. This paper describes the fouling analysis technique developed in this study which can analyze the thermal performance for heat exchangers and estimate the future fouling variations. To develop the fouling analysis technique for heat exchangers, fouling factor was introduced based on the ASME O&M codes and TEMA standards. For the purpose of verifying the fouling analysis technique, the fouling analyses were performed for four heat exchangers in several nuclear power plants; two residual heat removal heat exchangers of the residual heat removal system and two component cooling water heat exchangers of the component cooling water system.

1. 서 론

열교환기의 주요 기능은 온도, 압력 및 성분이 다른 두 유체를 분리된 상태에서 열교환하여 계통특성에 맞도록 유체온도를 저하 또는 상승시키는 것이다. 열교환기 운전중 미세한 입자나 부식 생성물, 물에 부유하는 이물질 등이 열교환기의 저속 또는 정체부위에 침적될 경우에는 정상적인 유체흐름을 방해하고 압력손실, 부식 발생원 등의 작용을 하며 특히, 열교환기의 고유기능인 열 성능을 저하시킨다. 이러한 현상을 파울링

(fouling)이라 하며 주로 전열관 표면, 유동이 정체되거나 저속으로 흐르는 고정관판과 전열관 연결부, 배플과 전열관 사이 등에서 발생한다.

열교환기의 성능을 평가하는 방법으로는 온도차 감시방법, 압력손실 감시방법, 열전달계수 검사방법 등이 제시되어 있으나 대부분 평가시점에서의 운전 허용 가능성만을 다루고 있다. 국내 원전에서는 미국 EPRI 지침⁽¹⁾에 따른 열전달계수 검사방법을 적용하고 있으나 이를 적용하기 위해서는 일부 운전조건을 설계조건과 동일하게 설정해야 하는 등 많은 어려움이 존재하고 있다. 또한 시간에 따른 오염계수(fouling factor) 변화에 관한 연구가 국내에서 수행된 바 있지만 단일 전열관에 대해 기상 조건에서 짧은 시간동안 실험한 결과였다.⁽²⁾ 이외에 액체 유동층 열교환기의 파울링 연구,⁽³⁾ 지열수(geothermal water) 열교환기

[†] 책임저자, 회원, 한전기술(주) 재료기술연구그룹
E-mail : hkm@kopec.co.kr
TEL : (031)289-4287 FAX : (031)289-3189

^{*} 회원, 한전기술(주) 재료기술연구그룹

의 파울링 연구⁽⁴⁾ 등이 있었으나 대부분은 특수 분야에 적용이 가능한 실험적 연구에 한정되었으며, 실제 산업플랜트에서 장기간 광범위하게 운전되고 있는 열교환기의 파울링 평가에 관한 연구는 아직까지 수행된 바가 없었다.

이에 따라 본 연구에서는 고온의 공정수를 찬물로 냉각하도록 설계된 원전 다관원통형 열교환기의 성능을 보다 간편하게 분석하고 향후 변화를 예측할 수 있는 파울링 해석기법을 개발하였다. 본 파울링 해석기법 개발에는 상변화 없는 열교환기의 열전달계수 검사방법을 응용하고 오염계수를 도입하였다. 또한 개발한 해석기법을 2가지 유형의 4개 열교환기에 적용하여 파울링 진행 경향을 분석하였다.

2. 평가이론 및 방법

열교환기에서 일반적으로 발생하는 파울링은 물속에 부유하는 다공성 불용물질 즉, 공기에서 발생한 입자, 부식 생성물, 물에 떠다니는 실트, 점토, 유기물질과 미생물, 경수에 포함된 칼슘 침전물, 반응도 조절을 위해 사용되는 붕소 침전물 등으로 인해 발생한다.⁽⁵⁾ 이러한 파울링 현상은 열교환기에서 정상 유체흐름을 방해하고 압력손실, 부식 발생원 등의 작용을 하며, 특히 열교환기의 열성능을 저하시킨다. 본 연구에서 제시하는 열교환기 파울링 해석 이론 및 방법은 코일, 편튜브형 열교환기를 제외하고 열전달 공정 수행 중에 상변화가 발생하지 않는 모든 열교환기에 적용이 가능하다. 파울링 평가에 필요한 기본 데이터는 다음과 같다.

- T_1, T_2 : 공정수 입구 및 출구온도, °C
- t_1, t_2 : 냉각수 입구 및 출구온도, °C
- W_p, W_c : 공정수 및 냉각수 유량, kg/hr
- C_{p_p}, C_{p_c} : 공정수 및 냉각수 비열, kcal/kg·°C
- k_p, k_c : 공정수 및 냉각수 열전도도, kcal/m-hr·°C
- ρ_p, ρ_c : 공정수 및 냉각수 밀도, kg/m³
- μ_p, μ_c : 공정수 및 냉각수 점도, Pa-sec
- 기타 열교환기 기하학 데이터

상기 데이터 취득이 완료되면 공정수 및 냉각수의 열전달량(heat duty)은 식 (1)과 (2)로부터 계

산이 가능하다.

$$Q_p = W_p [C_{p_p} (T_1 - T_2)] \quad (1)$$

$$Q_c = W_c [C_{p_c} (t_2 - t_1)] \quad (2)$$

여기서, Q_p 와 Q_c (kcal/hr)는 공정수 및 냉각수 열전달량을 나타낸다.

공정수와 냉각수의 열전달량이 계산되면 열교환기의 냉각방식에 따라 병류(parallel flow)일 경우에는 식 (3)을 사용하고 향류(counter flow)일 경우에는 식 (4)를 사용하여 대수평균 온도차(LMTD : logarithmic mean temperature difference)를 계산한다.

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \left[\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2} \right]} \quad (3)$$

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left[\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right]} \quad (4)$$

상기 두 식으로 계산된 대수평균 온도차는 다중 동체 또는 다중 전열관의 경우(예, 1-2, 2-4 pass 열교환기 등)에 실제 향류조건에서 벗어나는 편차를 고려하기 위하여 식 (5)를 이용하여 보정한다.

$$MTD = LMTD \cdot F \quad (5)$$

여기서, MTD(mean temperature difference)는 보정된 평균 온도차(°C)를 나타내고, F는 대수평균 온도차 보정계수를 나타낸다. 대수평균 온도차는 분리유동, 교차유동 등일 경우에 향류로부터 벗어나는 정도를 보정하는데 적용되며, 향류와 병류일 경우에는 1이다. 1-2 pass 열교환기의 경우를 예로 들면 대수평균 온도차 보정계수, F는 R과 P의 함수이며, $R \neq 1$ 인 경우에는 식 (6)을 사용하고 $R=1$ 인 경우에는 식 (7)을 적용한다.

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \cdot \frac{\ln \left(\frac{1 - P}{1 - PR} \right)}{\ln \frac{2 - P(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - P(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}} \quad (6)$$

$$F = \frac{P}{1 - P} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\ln \frac{2 - P(2 - \sqrt{2})}{2 - P(2 + \sqrt{2})}} \quad (7)$$

여기서, R과 P는 각각 식 (8), (9)와 같다.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (9)$$

보정된 평균 온도차와 열전달량을 이용한 총괄 열전달계수는 식 (10)으로 계산할 수 있다.

$$U = \frac{Q}{A_o MTD} \quad (10)$$

여기서, U는 외부표면 기준 총괄열전달계수 (kcal/hr-m²-°C)를 나타내고 A_o는 외부표면 기준 외부 유효표면적(m²)을 나타낸다. 전열관에 냉각핀이 설치되거나 관막음(plugging)되었을 경우에는 해당 전열면적을 계산에 반영하여야 한다.

열교환기의 유형이 분리유동(divided flow & split flow), 교차유동(cross flow) 등일 경우에는 식 (11)과 같이 무차원 전달단위수(NTU : number of transfer units) 방식을 사용하여 총괄열전달계수를 계산한다.

$$U = \frac{NTU W_c C_{p_c}}{A_o} \quad (11)$$

여기서, NTU는 식 (8)과 식 (9)에 제시된 R과 P의 함수로서 R=0이거나 R=∞인 경우에는 식 (12)를 사용하고 R≠0이거나 R≠∞인 경우에는 식 (13)을 사용하여 계산한다.

$$NTU = \ln\left(\frac{1}{1-P}\right) \quad (12)$$

$$NTU = \frac{1}{\sqrt{R^2+1}} \cdot \ln\left(\frac{2-P(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-P(R+1+\sqrt{R^2+1})}\right) \quad (13)$$

총괄열전달계수가 결정되면 열교환기의 오염 정도를 판단할 수 있도록 오염계수(r_i)를 도입한다. 오염계수는 총괄열전달계수 계산 식 (14)로부터 계산이 가능하다.

$$U = \frac{1}{\left[r_i + \frac{1}{h_o} \frac{1}{E_f} + r_w + \frac{1}{h_i} \frac{A_o}{A_i} \right]} \quad (14)$$

여기서, h_o와 h_i는 각각 외부표면 기준 외부 열전달계수(kcal/hr-m²-°C)와 내부표면 기준 내부 열전달계수를 나타낸다. r_i, r_o, r_w, r_i는 각각 외부표면 기준 전체 오염저항(m²-°C/W), 외부표면 기준 외부 오염저항, 내부표면 기준 내부 오염저항 및 외부표면 기준 관벽저항을 나타낸다. 그리고 A_i는 내부표면 기준 내부 유효표면적(m²), E_f는 가중편효율(핀이 없을 경우 1, 핀이 있는 경우 1 이하)을 나타낸다. 외부표면 기준 외부 오염저항은 식 (15)를 이용하여 구할 수 있다.

$$r_i = r_o \frac{1}{E_f} + r_i \frac{A_o}{A_i} \quad (15)$$

내부표면 기준 내부 열전달계수는 난류유동(Re > 10,000)인 경우에는 식 (16)으로 계산하고 층류유동(Re < 2,100)인 경우에는 식 (17)을 이용하여 계산한다.

$$h_i = 0.023 \frac{12 k_t}{d_i} Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (16)$$

$$h_i = 1.86 \frac{12 k_t}{d_i} Re^{1/3} Pr^{1/3} \left(\frac{d_i}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (17)$$

여기서, k_t는 전열관측 유체의 열전도도(kcal/hr-m-°C), d_i는 전열관 내경(m), μ_b는 전열관측 유체의 절대점도(cp), μ_w는 전열관벽 온도에서 전열관측 유체의 절대점도(cp), L은 전열관 전체길이(m), ρ_t는 전열관측 유체의 밀도(kg/m³), V는 유량과 교차유동 단면적에 근거한 전열관 내 유속(m/sec)을 나타낸다. 그리고 전열관측 유체의 무차원 Re수와 Pr수는 식 (18)과 식 (19)로부터 구할 수 있다.

$$Re = \frac{124 \rho_t V d_i}{\mu_t} \quad (18)$$

$$Pr = \frac{2.42 C_{p_t} \mu_t}{k_t} \quad (19)$$

외부표면 기준 외부 열전달계수(h_o)는 식 (20)을 이용하여 계산한다.⁽⁶⁾

$$h_o = h_k J_c J_l J_b J_r \quad (20)$$

여기서, h_k, J_c, J_l, J_b, J_r은 각각 동체측 열전달계수, 배플형상 보정계수, 배플 누설효과 보정계수, 전열관 다발 우회효과 보정계수 및 역온도구배누적(adverse temperature-gradient buildup) 보정계수를 나타낸다.

식 (20)을 이용하여 외부 열전달계수를 계산하기 위해서는 우선 동체측으로 흐르는 유체의 Re수를 계산해야 한다. 동체측으로 흐르는 유체의 Re수는 식 (21)을 이용하여 계산한다.

$$Re_s = \frac{d_o W}{\mu_b S_m} \quad (21)$$

여기서, μ_b는 벌크온도에서의 점도(Pa-sec), S_m은 교차유동 영역 중심부에서의 단면적을 나타낸다. 전열관 배열이 사각구조인 경우와 삼각구조인 경우의 S_m은 각각 식 (22)와 식 (23)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$S_m = l_s \left[D_s - D_{out} + \frac{D_{out} - d_o}{p_n} (p' - d_o) \right] \quad (22)$$

$$S_m = l_s \left[D_s - D_{out} + \frac{D_{out} - d_o}{p'} (p' - d_o) \right] \quad (23)$$

여기서, l_s 는 배플 사이의 거리(m), D_s 는 동체 내경(m), D_{out} 은 전열관 다발 외경(m), d_o 는 전열관 외경(m) 그리고 p_n 은 유체 흐름방향에 수직인 전열관 피치(m)를 나타낸다. 식 (21)에서 계산된 Re 수로부터 전열관 배열 보정계수(J_k)는 관련 핸드북⁽⁶⁾에서 확인할 수 있다.

전열관 배열 보정계수가 결정되면 식 (24)를 사용하여 동체측의 열전달계수를 계산한다.

$$h_k = j_k C p_s \frac{W}{S_m} \left(\frac{k_s}{C p_s \mu_s} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (24)$$

여기서, $C p_s$ 는 동체측 유체의 비열(kcal/kg·°C), μ_b 는 벌크유체 점도(Pa·sec)를 나타낸다.

배플형상에 대한 보정계수(J_c)를 구하기 위해서는 교차유로에서 전체 전열관의 비율이 계산되어야 한다. 이는 식 (25)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$F_C = \frac{1}{\pi} \left[\pi + 2 \frac{D_s - 2l_c}{D_{out}} \sin \left(\cos^{-1} \frac{D_s - 2l_c}{D_{out}} \right) - 2 \cos^{-1} \frac{D_s - 2l_c}{D_{out}} \right] \quad (25)$$

여기서, l_c 는 배플킷(m)을 나타낸다.

배플 누설효과에 대한 보정계수(J_l)를 구하기 위해서는 1개 배플에 대한 전열관-배플 사이의 누설면적(S_{lb}), 1개 배플에 대한 동체-배플 사이의 누설면적(S_{sb}), 전열관 배열에 대한 보정계수(S_m)를 알아야 한다. S_{lb} 는 식 (26)으로 계산할 수 있으며, S_{sb} 는 식 (27), S_m 은 식 (22)와 식 (23)으로 계산할 수 있다.

$$S_{lb} = b D_o N_T (1 + F) \quad (26)$$

$$S_{sb} = \frac{D_s \delta_{sb}}{2} \left[\pi - \cos^{-1} \left(1 - \frac{2l_c}{D_s} \right) \right] \quad (27)$$

여기서, $\cos^{-1}(1-2l_c/D_s)$ 는 $0 \sim \pi/2$ 사이의 라디안을 나타내고 δ_{sb} 는 동체-배플 사이의 틈(clearance)으로서 동체의 직경이 24인치 이상인 경우에는 rolled-shell 사양을 사용해야 한다. b 는 상수로서 SI 단위인 경우에는 6.223×10^{-4} 이고 British 단위인 경우에는 1.701×10^{-4} 이다. 그리고 N_T 는 전체 전열관수를 나타내며, F_C 는 식 (25)를 활용하여 구할 수 있다.

전열관 다발 우회(bundle-bypassing) 효과에 대한 보정계수(J_b)를 구하기 위해서는 밀봉 스트립(sealing strips)의 개수(N_{ss})와 교차유동 영역 내의 전열관 개수(N_C)를 알아야 한다. 그리고 우회흐름

에 대한 교차유동 단면적 분율, F_{bp} 는 식 (28)로 계산이 가능하다.

$$F_{bp} = \frac{(D_s - D_{out}) l_s}{S_m} \quad (28)$$

한편, Re수가 작을 경우에는 역온도구배 누적에 대한 보정계수(J_r)를 적용해야 하지만 대부분의 동체-전열관형 열교환기에는 Re수가 10,000 이상인 난류 유동이므로 본 보정계수는 적용되지 않는다.

r_w 는 외부표면 기준 관벽저항으로서 식 (29)로 계산이 가능하다.⁽⁷⁾

$$r_w = \frac{d_o}{24 k} \ln \left(\frac{d_o}{d_o - 2t} \right) \quad (29)$$

이와 같이 모든 변수에 대한 계산이 완료되면 식 (30)으로부터 전열관 내부 및 외부의 오염저항이 모두 고려된 전체 오염계수를 계산할 수 있다.

$$r_i = \frac{1}{U} - \frac{1}{h_o} - \frac{1}{E_f} - r_w - \frac{1}{h_i} - \frac{A_o}{A_i} \quad (30)$$

열교환기의 열교환 성능에 관련된 허용기준은 Table 1에 제시하였다.⁽⁸⁾ 열교환기의 오염정도를 결정하는데 사용되는 오염계수 허용기준은 총괄 열전달계수를 환산함으로써 추정이 가능하다. 여기서 유량기준은 열교환기의 진동과 Flushing 배제를 위한 상한값으로서 열성능과는 무관하다. 이러한 해석기법을 적용하여 주기적으로 열교환기 평가를 수행할 경우, 파울링 진행추이 외에도 평가시점에서 열교환기의 열전달량, 총괄열전달계수 및 Performance Capability를 분석할 수 있으며, 장기적으로는 열교환기 정비계획 수립에도 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

3. 파울링 해석기법 적용

본 연구에서 개발한 파울링 해석기법을 실제 원전 열교환기에 적용할 수 있는지 여부를 검토하기 위하여 국내 2가지 유형의 4개 열교환기에 적용하여 보았다. 대상 열교환기는 잔열제거(residual heat removal) 열교환기 2개와 기기냉각수(component cooling water) 열교환기 2개이다. 해석에 적용한 입력값은 기존 발전소에서 열성능 점검을 위하여 장기간에 걸쳐 측정된 데이터이다.

3.1 잔열제거 열교환기

잔열제거 열교환기는 원자로 냉각 및 핵연료

Table 1 Allowable criteria for heat exchangers

Parameters	Allowable Criteria	Units	
		British	SI
System Flow	+10%	lb/hr	kg/hr
Head	+10%	psi	kPa
Overall heat transfer coefficient	-10%	Btu/ft ² -hr-°F	kcal/m ² -hr-°C

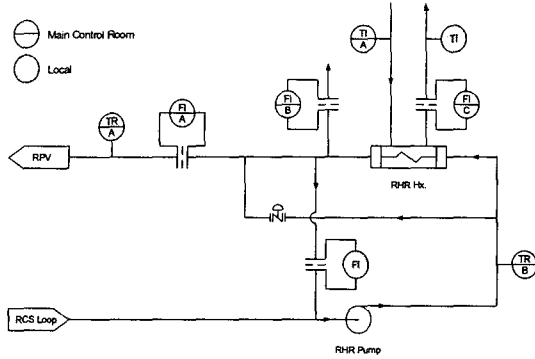


Fig. 1 Flow diagram for RHR System

Table 2 Measured data for RHR Heat Exchangers

Hx.	yrs	Process Fluid			Cooling Fluid		
		Inlet Temp.	Outlet Temp.	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Flow Rate
		°C	°C	kg/hr	°C	°C	kg/hr
RHR-A	1997	59.90	37.50	5.1 ₅ ×10 ⁵	21.98	40.00	6.4 ₅ ×10 ⁵
	2002	81.50	54.80	5.0 ₅ ×10 ⁵	28.04	49.50	6.3 ₅ ×10 ⁵
RHR-B	1996	28.00	21.50	6.8 ₅ ×10 ⁵	16.10	28.00	8.1 ₅ ×10 ⁵
	2001	78.80	39.33	5.1 ₅ ×10 ⁵	21.07	40.47	1.1 ₆ ×10 ⁶

Table 3 Evaluation results for A-RHR Hx

Items	Units	Criteria	1997	2002
Q	kcal/hr	-	11.5×10 ⁹	13.5×10 ⁹
U*	-	≥0.90	1.51	1.06
FF	m ² °C/W	≤3.0×10 ⁻⁴	0.8×10 ⁻⁴	2.3×10 ⁻⁴

[주] U* : U₁A/U₀A₀

제장전 동안 원자로 냉각재의 온도를 정지냉각온도로 감소시키기 위해 원자로 냉각재계통에서 기기냉각수 계통으로 열을 전달하고 발전소가 재기동될 때까지 정지냉각 온도로 유지시키는 역할을 하기 때문에 정상운전 중에는 작동하지 않는다. 잔열제거 열교환기는 동체측으로 흐르는 기기냉각수가 1회에 걸쳐 통과하고 전열관측으로 흐르는 원자로 냉각재가 동체 내에서 2회에 걸쳐 통

Table 4 Evaluation results for B-RHR Hx

Items	Units	Criteria	1996	2001
Q	kcal/hr	-	4.8×10 ⁹	21.4×10 ⁹
U*	-	≥0.90	1.13	1.04
FF	m ² °C/W	≤2.5×10 ⁻⁴	0.7×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻⁴

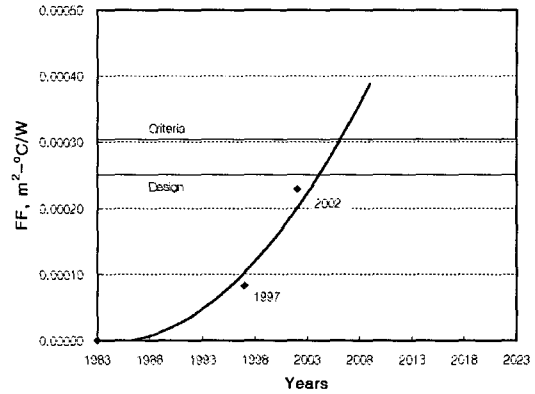


Fig. 2 Fouling evaluation results for A-RHR Hx

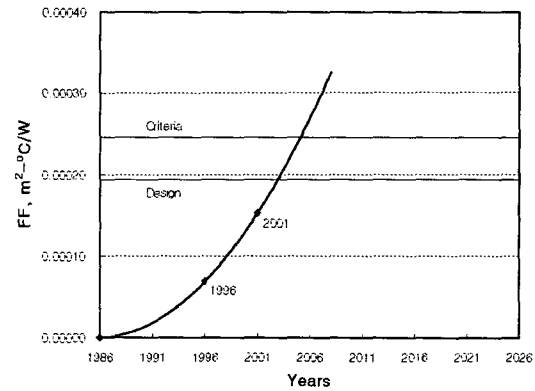


Fig. 3 Fouling evaluation results for B-RHR Hx

과하는 1-2 Pass 열교환기이다. Fig. 1은 원전에 설치되어 있는 잔열제거 열교환기 관련 계통도를 개략적으로 나타낸 것이다. Table 2는 두 개의 잔열제거 열교환기별 입력데이터로서 일정 시간간격으로 취득한 평균 데이터이다. 여기서 입구온도의 차이는 원자로 정지 후의 잔열제거열교환기 데이터 취득시점 때문에 나타난 것이다.

Table 3과 4에는 평가 결과를 제시한 것으로서 평가시점에서의 열전달량을 제시하고 Performance Capability Ratio(U*)를 운전 허용기준과 비교하였다. 또한 오염계수는 총괄열전달계수 허용범위인

-10%를 환산한 허용기준과 비교하였다. 그 결과 잔열제거 열교환기 A와 B는 모두 최종 년도까지 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 2와 3은 잔열제거 열교환기 A와 B의 파울링 평가 결과이다. 두 그림에서 볼 수 있듯이 오염계수는 평가 최종년도까지 모두 허용기준 이내에 있는 것을 알 수 있으며 운전년수에 따라 지수함수적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그림의 추이대로 파울링이 진행된다고 가정하면 잔열제거 열교환기 A와 B는 각각 2006년과 2005년경에 허용기준을 초과할 것으로 예상된다.

3.2 기기냉각수 열교환기

기기냉각수 열교환기는 2가지 유형의 열교환기를 대상으로 하였다. 기기냉각수 열교환기 A는 동체측으로 흐르는 기기냉각수가 1회에 걸쳐 통과하고 전열관측으로 흐르는 해수가 동체 내에서 2회에 걸쳐 통과하는 1-2 pass 열교환기이며, 기기냉각수 열교환기 B는 1-1 pass 대향류 열교환기이다. 기기냉각수 열교환기는 1차계통의 기기에서 발생하는 열을 해수계통으로 전달하는 역할을 하기 때문에 정상운전 중에 항상 작동한다. Fig. 4는 원전에 설치되어 있는 기기냉각수 열교환기 관련 계통도를 개략적으로 나타낸 것이다.

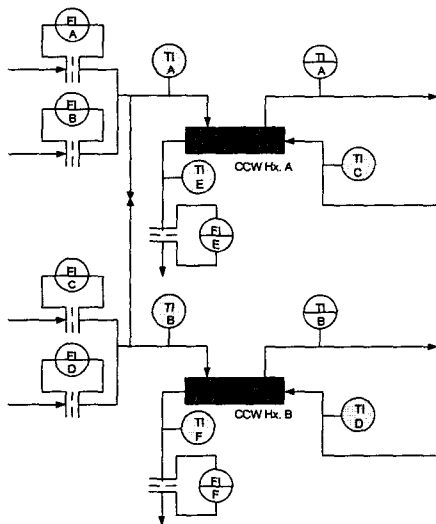


Fig. 4 Flow diagram for CCW System

Table 5는 2가지 유형의 기기냉각수 열교환기 별 입력데이터로서 일정 시간간격으로 취득한 평균 데이터이다. Table 6과 7은 2가지 기기냉각수 열교환기에 대한 연도별 평가 결과를 제시한 것이다. 기기냉각수 열교환기 A는 평가 최종년도까지 모두 허용기준을 만족하지만 기기냉각수 열교환기 B의 Performance Capability Ratio는 2002년도에 허용기준치와 동일한 값으로 계산되었으며, 오염계수도 허용기준치에 근접하고 있는 것으로 계산되었다. Fig. 5와 6은 기기냉각수 열교환기 A와 B의 파울링 평가 결과를 나타내며, 기기냉각수 열교환기 역시 운전년수 증가에 따라 지수함수적으로 오염이 증가하는 것을 알 수 있다. 그림의 추이대로 파울링이 진행된다고 하면 기기냉각수 열교환기 A와 B는 각각 2006년과 2003년경에 허용기준을 초과할 것으로 예상된다.

Table 5 Measured data for CCW Heat Exchangers

Hx.	yrs	Process Fluid			Cooling Fluid		
		Inlet Temp.	Outlet Temp.	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Flow Rate
		°C	°C	kg/hr	°C	°C	kg/hr
CCW-A	1997	33.10	30.45	2.6×10 ⁶	27.90	30.95	2.5×10 ⁶
	2002	29.50	27.50	2.6×10 ⁶	25.20	27.60	2.5×10 ⁶
CCW-B	1992	24.50	20.00	2.9×10 ⁶	16.60	20.56	3.5×10 ⁶
	1996	19.60	15.70	2.7×10 ⁶	12.80	15.70	3.9×10 ⁶
	1997	24.00	21.50	2.7×10 ⁶	18.00	20.56	3.9×10 ⁶
	2002	26.50	20.60	2.7×10 ⁶	14.80	18.60	4.0×10 ⁶

Table 6 Evaluation results for A-CCW Hx

Items	Units	Criteria	1997	2002
Q	kcal/hr	-	6.9×10 ⁹	5.3×10 ⁹
U'	-	≥0.9	1.52	1.11
FF	m ² °C/W	≤4.0×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻⁴	2.6×10 ⁻⁴

Table 7 Evaluation results for B-CCW Hx

Items	Units	Criteria	1992	1996	1997	2002
Q	kcal/hr	-	13.2×10 ⁹	10.4×10 ⁹	6.8×10 ⁹	15.8×10 ⁹
U'	-	≥0.9	1.5	1.3	1.2	0.9
FF	m ² °C/W	≤5.2×10 ⁻⁴	1.9×10 ⁻⁴	2.2×10 ⁻⁴	3.1×10 ⁻⁴	4.9×10 ⁻⁴

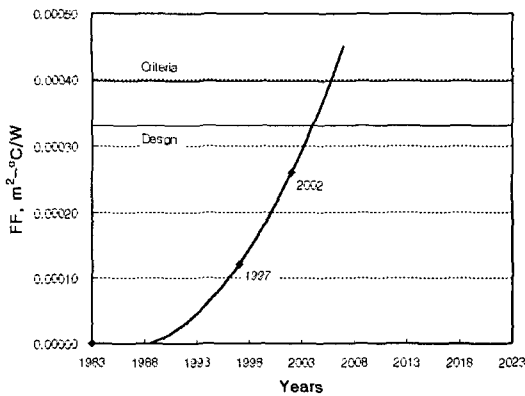


Fig. 5 Fouling evaluation results for A-CCW Hx

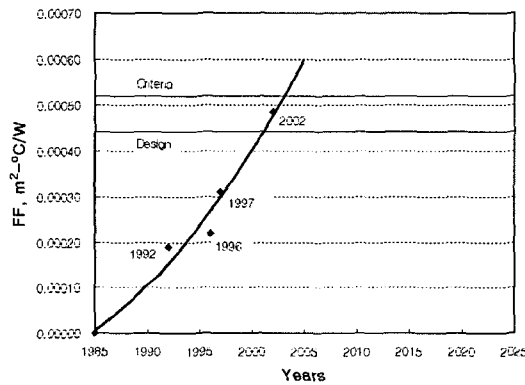


Fig. 6 Fouling evaluation results for B-CCW Hx

4. 결론

원전에 사용되고 있는 다관원통형 열교환기의 성능과 오염진행 추이를 효율적으로 분석하기 위하여 파울링 해석기법을 개발하였다. 해석기법은 상변화 없는 모든 다관원통형 열교환기에 적용할 수 있으며, 운전 허용기준은 ASME OM 코드를 준용하였다. 본 파울링 해석기법의 적용 가능성 분석을 위하여 국내 원전에 적용되고 있는 두 종류의 잔열제거 열교환기와 두 종류의 기기냉각수 열교환기 4개에 적용하였다. 본 연구에 적용된 4개의 열교환기 모두의 파울링 진행추이는 지수함수적으로 증가하고 있음을 확인하였다. 본 해석기법으로는 파울링 진행추이 외에도 평가시점에

서 열교환기 Performance Capability Ratio 관점의 계속운전 허용 가능성도 동시에 분석할 수 있다.

이러한 파울링 해석기법을 열교환기 적용할 경우에는 운전유량과 입구 온도를 설계조건과 동일하게 설정해야 하는 어려움을 배제할 수 있으며, 평가시점에서의 열교환기 열적성능 외에도 열교환기의 파울링 진행추이도 알 수 있다. 또한 열교환기 파울링 진행추이에 따라 열교환기 관리방안 수립에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) EPRI, 1991, *Heat Exchanger Performance Monitoring Guidelines*, NP-7552.
- (2) Ha, M. Y., Lee, D. R., Ahn, S. P., and Park H. D., 1998, "An Experimental Study on Fouling over a Single Tube," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 6, pp. 1162~1173.
- (3) Kim, N. H., Lee, Y. P., and Yoon, S. Y., 1995, "A Study on the Pressure Loss, Heat Transfer Performance, and Fouling Control in Liquid Fluidized Bed Heat Exchangers," *Energy Engg. Journal*, Vol. 4, pp. 59~66.
- (4) Kim, M. S. and Ota Terukazu, 1997, "Fouling Effect of Geothermal Water Scale on Heat Transfer Around a Tube in a Bank," *KSME International Journal*, Vol. 11, pp. 705~713.
- (5) Conklin, J. E., 1995, *Aging Management Evaluation for Heat Exchangers*, WCAP-14341, Westinghouse Owner's Group.
- (6) Perry, R. H., *Chemical Engineer's Handbook*, Sixth Edition, McGraw Hill, pp. 10. 24~10. 31.
- (7) TEMA, 1988, *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 7th Edition, pp. 101~104.
- (8) ASME, 1994, *Standards and Guides for Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants*, ASME OM-S/G-Part 2.