주기적안전성평가를 위한 원전 열교환기 **Fouling** 평가

황경모† ·진태은*·한상길**·김병섭**

Fouling Analyses of Heat Exchangers for PSR

K. M. Hwang, T. E. Jin, S. G. Han, and B. S. Kim

Key Words: Fouling Factor(오염계수), Overall Heat Transfer Coefficient(총괄 열전달계수)

Abstract

Fouling of heat exchangers is generated by water-borne deposits, commonly known as foulants including particulate matter from the air, migrated corrosion produces; silt, clays, and sand suspended in water; organic contaminants; and boron based deposits in plants. This fouling is known to interfere with normal flow characteristics and reduce thermal efficiencies of heat exchangers. This paper focuses on fouling analyses for six heat exchangers of two primary systems in two nuclear power plants; the regenerative heat exchangers of the chemical and volume control system and the component cooling water heat exchangers of the component cooling water system. To analyze the fouling for heat exchangers, fouling factor was introduced based on the ASME O&M codes and TEMA standards. Based on the results of the fouling analyses, the present thermal performances and fouling levels for the six heat exchangers were predicted.

기호설명

A_i : Inside effective surface area
A_o : Total effective surface area
b : Constant
Cp_s, Cp_t: Shell and tube side fluid specific heat
Cp_p, Cp_c : Process and cooling fluid specific heat
d_i : Tube inside diameter
d_o : Tube outside diameter
D_{otl} : Shell outer tube limit
D_s : Shell inside diameter
E_f : Weighted fin efficiency
F : LMTD correction factor
F_{bp} : Fraction of cross flow area available for bypass flow
h_i : Inside film coefficient
h_k : Shell side heat transfer coefficient for an ideal tube bank

† 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹
E-mail : hkm@kopec.co.kr
TEL : (031)289-4287 FAX : (031)289-3189
* 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹
** 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원

h_o : Outside film coefficient
J_b : Correction factor for tube bundle bypass
J_c : Correction factor for baffle configuration
J_l : Correction factor for baffle leakage
J_r : Correction factor for adverse temperature gradient buildup
k_s : Shell side fluid thermal conductivity
k_s : Tube side fluid thermal conductivity
k_p, k_c : Process and cooling fluid thermal conductivity
L : Tube length
l_c : Baffle cut
LMTD : Logarithmic mean temperature difference
l_s : Baffle spacing
MTD : Mean temperature difference
N_C : Number of tubes in one cross flow section
N_{ss} : Number of sealing strips
N_T : Total number of tubes
NTU : Number of transfer units
p_n : Tube pitch
Pr : Prandtl number
Q_p, Q_c : Process and cooling fluid heat duty
Re : Reynolds number
r_i : Inside fouling resistance
r_o : Outside fouling resistance
r_t : Total fouling resistance
r_w : Tube wall resistance
S_m : Cross flow area at or near centerline for one cross

flow section
S_{tb} : Tube-to-baffle area for one baffle
t_1, t_2 : Cooling fluid inlet and outlet temperature
T_1, T_2 : Process fluid inlet and outlet temperature
U : Overall heat transfer coefficient
V : Flow velocity based on tube cross section
W : Weight flow rate
W_p, W_c : Process and cooling fluid flow rate
δ_{sb} : Diametral shell-baffle clearance
μ_b : Bulk fluid viscosity
μ_p, μ_c : Process and cooling fluid viscosity
μ_w : Viscosity at average surface temperature
ρ_p, ρ_c : Process and cooling fluid density
ρ_t : Tube side fluid density

1. 서 론

열교환기의 주요 기능은 온도, 압력 및 성분이 다른 두 유체를 분리된 상태에서 열교환하여 계통특성에 맞도록 유체온도를 저하 또는 상승시키는 것이다. 열교환기 운전 중 미세한 입자나 부식생성물, 물에 부유하는 이물질 등이 열교환기의 저속 또는 정체부위에 침적될 경우에는 정상적인 유체흐름을 방해하고 압력손실, 부식 발생원 등의 작용을 하며 특히, 열교환기의 고유기능인 열성능을 저하시킨다. 이러한 현상을 Fouling이라 하며 주로 전열관 표면, 유동이 정체되거나 저속으로 흐르는 고정관판과 전열관 연결부, 배플과 전열관 사이 등에서 발생한다.

열교환기 성능을 평가하는 방법으로는 온도차 감시방법, 압력손실 감시방법 등이 있으나 본 평가에서는 열전달계수 감시방법을 응용한 Fouling 평가기법을 적용하였다. 열성능 평가는 국내 원전의 주기적안전성평가의 일환으로 수행하였다. 본 고에서는 Fouling Factor를 도입하여 열교환기의 건전성 및 오염정도를 예측하는 이론과 국내 특정 두 개 원전의 6개 열교환기를 평가한 결과를 제시하였다.

2. 평가이론 및 방법

열교환기에서 일반적으로 발생하는 Fouling은 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[1]. 이러한 Fouling 현상은 열교환기에서 정상 유체흐름을 방해하고 압력손실, 부식 발생원 등의 작용을 하며, 특히 열교환기의 열성능을 저하시킨다. 본 고에서 제시하는 열교환기 Fouling 평가 이론 및 방법은 코일 튜브형 열교환기를 제외하고 열전달 공정 수행 중에 상변화가 발생하지 않는 모든 열교환기에 적용이 가능하다. Fouling 평가에 필요한 기본 데이터는 다음과 같다.

- ○ T_1, T_2 : 공정수 입구 및 출구온도, °F
- ○ t_1, t_2 : 냉각수 입구 및 출구온도, °F
- ○ W_p, W_c : 공정수 및 냉각수 유량, lb/hr
- ○ Cp_p, Cp_c : 공정수 및 냉각수 비열, Btu/lb-°F
- ○ k_p, k_c : 공정수 및 냉각수 열전도도, Btu/ft-hr-°F
- ○ ρ_p, ρ_c : 공정수 및 냉각수 밀도, lb/ft^3
- ○ μ_p, μ_c : 공정수 및 냉각수 점도, lb_f sec/ft
- ○ 기타 열교환기 기하학 데이터

상기 데이터 취득이 완료되면 공정수 및 냉각수의 열전달량(Heat Duty)은 식 (1)과 (2)로부터 계산이 가능하다.

$$Q_p = W_p [Cp_p (T_1 - T_2)] \quad (1)$$

$$Q_c = W_c [Cp_c (t_2 - t_1)] \quad (2)$$

여기서, Q_p와 Q_c(Btu/hr)는 공정수 및 냉각수 열전달량을 나타낸다.

공정수와 냉각수의 열전달량이 계산되면 열교환기의 냉각방식에 따라 병류일 경우에는 식 (3)을 사용하고 향류일 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(°F)를 나타내고, F는 대수평균 온도차 보정계수를 나타낸다. 대수평균 온도차는 분리유동(Divided Flow), 교차유동(Cross Flow) 등일 경우에 향류로부터 벗어나는 정도를 보정하는데 적용되며, 향류와 병류일 경우에는 1이다. 1-2 열교환기의 경우를 예로 들면 대수평균 온도차 보정계수, F는 R과 P의 함수이며, $R \neq 1$인 경우에는 식 (6)을 사용하고 R=1인 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 총괄 열전달계수 (Btu/hr-ft^2-°F)를 나타내고 A_o는 외부표면 기준 전 유효 표면적(ft^2)을 나타낸다. 전열관에 냉각핀이 설치되거나 관막음(Plugging)되었을 경우에는 해당 전열면적을 계산에 반영하여야 한다.

열교환기의 유형이 분리유동(Divided Flow & Spilt Flow), 교차유동(Cross Flow) 등일 경우에는 식 (11)과 같이 무차원 전달단위수(NTU : Number of Transfer Units) 방식을 사용하여 총괄 열전달계수를 계산한다.

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

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.

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

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

총괄 열전달계수가 결정되면 열교환기의 오염 정도를 판단할 수 있도록 Fouling Factor(r_t)를 도입한다. Fouling Factor는 총괄 열전달계수 계산식 (14)로부터 계산이 가능하다.

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

여기서, h_o와 h_i는 각각 외부표면 기준 외부 열전달계수(Btu/hr-ft^2-°F)와 내부표면 기준 내부 열전달계수를 나타낸다. r_t, r_o, r_i, r_w는 각각 외부표면 기준 전체 오염저항(hr-ft^2-°F/Btu), 외부표면 기준 외부 오염저항, 내부표면 기준 내부 오염저항 및 외부표면 기준 관벽저항을 나타낸다. 그리고 A_o는 외부표면 기준 외부 유효표면적(ft^2), A_i는 내부표면 기준 내부 유효표면적(ft^2), E_f는 가중 핀효율(핀이 없을 경우 1, 핀이 있는 경우 1 이하)을 나타낸다. 외부표면 기준 외부 오염저항은 다음 식 (15)를 이용하여 구할 수 있다.

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

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 벌크 열전도도 (Btu/hr-ft-°F), d_i는 전열관 내경(in), μ_b는 전열관측 유체의 벌크 절대점도(cp), μ_w는 전열관벽 온도에서 전열관측 유체의 벌크 절대점도(cp), L은 전열관 전체길이(in), ρ_t는 전열관측 유체의 벌크 밀도 (lb/ft^3), V는 유량과 교차유동 단면적에 근거한 전열관 내 유속(ft/sec)을 나타낸다. 그리고 전열관측 유체의 무차원 Reynolds Number와 Prandtl Number는 식 (18)과 식 (19)로부터 구할 수 있다.

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

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

외부표면 기준 외부 열전달계수(h_0)는 식 (20)을 이용하여 계산한다[2].

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

여기서, h_k, J_c, J_l, J_b, J_r은 각각 동체측 열전달계수, 배플형상 보정계수, 배플 누설효과 보정계수, 전열관 다발 우회효과 보정계수 및 역온도구배 누적(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(lb/ft-sec), S_m은 교차유동 영역 중심부에서의 단면적을 나타낸다. 전열관 배열이 사각구조인 경우와 삼각구조인 경우의 S_m은 식 (22)와 식 (23)을 이용하여 계산할 수 있다.

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

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

여기서, l_s는 배플 사이의 거리(in), D_s는 동체 내경(in), D_{otl}은 전열관 다발 외경(in), d_o는 전열관 외경(in) 그리고 p_n은 유체 흐름방향에 수직인 전열관 피치(in)를 나타낸다. 식 (21)에서 계산된 Re 수로부터 전열관 배열 보정계수(J_k)는 참고문헌 (3)에서 확인할 수 있다.

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

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

여기서, Cp_s는 동체측 유체의 비열(Btu/lb$_m$-°F), μ_b는 벌크유체 점도(lb/ft-sec)를 나타낸다.

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

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

여기서, l_c는 배플컷(in)을 나타낸다.

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

$$S_{tb} = b\, D_o\, N_T\,(1 + F_c) \quad (26)$$

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

여기서, $\cos^{-1}(1-2l_c/D_s)$는 0 ~ $\pi/2$ 사이의 라디안을 나타내고 δ_{sb}는 동체-배플 사이의 틈(Clearance)으로서 동체의 직경이 24인치 이상인 경우에는 Rolled-shell 사양을 사용해야 한다. b는 상수로서 SI 단위인 경우에는 6.223×10^{-4}이고 US Customary인 경우에는 1.701×10^{-4}이다. 그리고 N_T는 전체 전열관수를 나타내며, F_C는 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 우회흐름에 대한 교차유동 단면적 분율, F_{bp}는 식 (28)로 계산이 가능하다.

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

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_w는 외부표면 기준 관벽저항으로서 식 (29)로 계산이 가능하다.

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

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

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

열교환기의 열교환 성능에 관련된 허용기준은 표 1에 제시하였다[3]. 열교환기의 오염정도를 결정하는데 사용되는 Fouling Factor 허용기준은 총괄 열전달계수를 환산함으로써 추정이 가능하다.

Table 1 Allowable criteria for heat exchangers

매개변수	허용범위 (설계값 기준)	단위	
		BS	SI
유량[1]	+10%	gpm	m^3/sec
입출구 압력차[2]	+10%	psi	kPa
열전달량	-10%	Btu/hr	Cal/hr
총괄 열전달계수[3]	-10%	Btu/ft^2-hr-°F	Cal/cm^2-hr-℃

[주] (1) : 열교환기의 진동문제 배제를 위한 상한값
(2) : 열교환기의 압력강하 한계에 의해 결정되는 상한값
(3) : 열교환기의 오염으로 열전달 효과가 저하되는 현상을 배제하기 위한 하한값

3. 열성능 평가결과

3.1 재생 열교환기

재생 열교환기는 U형 전열관을 가지는 2-Shell 열교환기로서 2개의 동체가 수직으로 나란히 배치되어 있다. 각각의 열교환기는 동체측으로 유출수가 1회에 걸쳐 통과하고 전열관측으로 충전수가 1회에 걸쳐 통과하는 1-1 Pass 열교환기이다. 재생 열교환기는 원자로 냉각재계통으로 저온수가 주입될 경우에 발생 가능한 반응도 효과와 열충격을 최소화하기 위하여 유출수를 이용하여 충전수를 가열함으로써 열을 회수할 수 있도록 설계되었다. 따라서 Fouling 평가를 위한 운전 데이터는 원자로가 정상운전 중일 때의 값들이다.

그림 1은 재생 열교환기 관련 계통도를 개략적으로 나타낸 것이다. 표 2는 호기별로 취득한 평균 데이터이다.

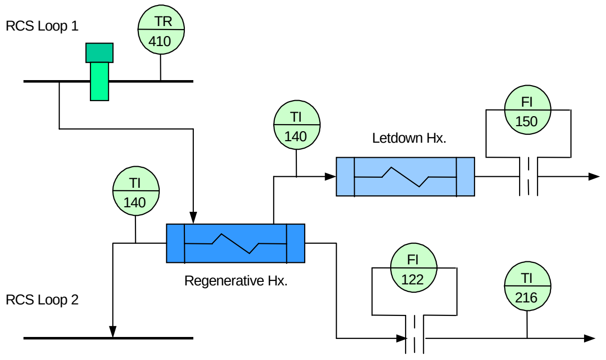

Fig. 1 Flow diagram for Regenerative Hx.

Table 2 Measured data for Regenerative Hx.

항목	유출수			충전수		
	입구온도	출구온도	유량	입구온도	출구온도	유량
단위	°F	°F	lb/hr	°F	°F	lb/hr
K-3	559.1	240.0	34,758.4	101.4	502.9	29,180.6
K-4	559.0	258.1	34,647.6	100.3	514.4	26,737.8

표 3은 평가결과를 제시한 것으로서 열전달량, 열전달계수 및 비열전달계수는 ASME OM 코드에서 제시하고 있는 허용기준과 비교하였고 Fouling Factor는 총괄 열전달계수 허용범위인 -10%를 환산한 허용기준과 비교하였다. 결과는 K-3과 K-4 모두 만족으로 평가되었다.

Table 3 Evaluation results for Regenerative Hx.

호기	항목	단위	계산값	판정기준
K-3	Q	Btu/hr	11,927,347	> 9,765,446
	Ut	Btu/ft^2°Fhr	372	> 323
	$U_tA/U_{t0}A_0$	-	1.038	> 0.9
	FF	-	0.000557	< 0.000993
K-4	Q	Btu/hr	11,292,555	> 9,765,446
	Ut	Btu/ft^2°Fhr	360	> 323
	$U_tA/U_{t0}A_0$	-	1.022	> 0.9
	FF	-	0.000582	< 0.000993

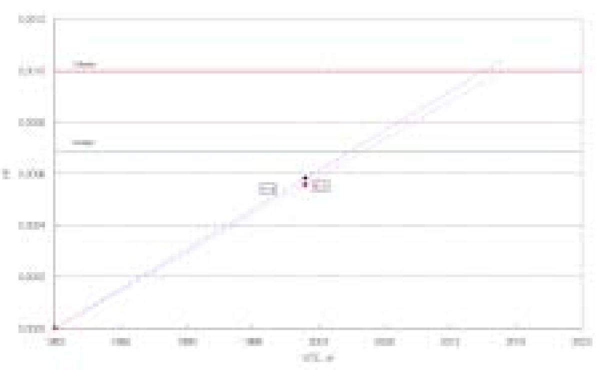

Fig. 2 Fouling evaluation results for Regen. Hx.

그림 2는 평가결과로 확인된 Fouling Factor를 허용기준 및 설계값과 현재의 오염정도를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 2002년 현재 K-3 및 K-4 호기 모두 허용기준을 만족하고 있는 것으로 평가되었다.

3.2 기기냉각수 열교환기

기기냉각수 열교환기는 동체측으로 흐르는 기기냉각수가 1회에 걸쳐 통과하고 전열관측으로 흐르는 해수가 동체 내에서 1회에 걸쳐 통과하는 1-1 Pass 대향류 열교환기이다. 기기냉각수 열교환기는 1차계통의 기기에서 발생되는 열을 해수계통으로 전달하는 역할을 하기 때문에 정상운전중에 항상 작동한다. 기기냉각수 열교환기는 그림 3에서 볼 수 있듯이 호기별로 A, B 2기가 설치되어 있다.

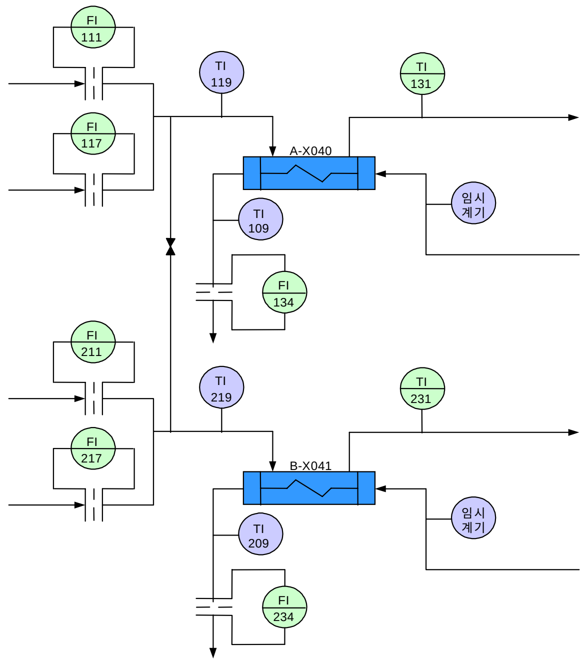

Fig. 3 Flow diagram for CCW Hx.

표 4는 호기별로 취득한 평균 운전 데이터로서 해당 원전의 Fouling 평가는 1992년부터 현장에서 취득한 데이터를 활용하였다. 표 5는 평가결과를 제시한 것으로서 열전달량, 열전달계수 및 비열전달계수는 ASME OM 코드에서 제시하고 있는 허용기준과 비교하였고 Fouling Factor는 총괄 열전달계수 허용범위인 -10%를 환산한 허용기준과 비교하였다. 비교시점은 열교환기별로 평가를 수행한 가장 최근이다. 평가결과 K-3호기의 기기냉각수 열교환기 A를 제외한 나머지 열교환기는 모두 허용기준을 만족하고 있는 것으로 평가되었다.

Table 4 Measured data for CCW Hx.

항목			기기냉각수			해수		
			입구 온도	출구 온도	유량	입구 온도	출구 온도	유량
단위			°F	°F	lb/hr	°F	°F	lb/hr
K-3	A	1992. 6	76.1	68.0	6.5×10^6	61.9	69.0	7.7×10^6
		1996. 5	67.3	60.3	5.9×10^6	55.0	60.3	8.6×10^6
		2002. 7	79.7	69.1	5.9×10^6	58.6	65.5	8.9×10^6
	B	1996. 1	67.8	59.5	6.0×10^6	53.3	59.4	9.1×10^6
		1996. 4	64.4	59.4	6.0×10^6	55.4	59.0	8.9×10^6
		1997. 6	80.6	75.2	5.6×10^6	68.9	74.3	8.9×10^6
		2002. 6	77.5	66.2	5.6×10^6	55.4	63.7	8.9×10^6
K-4	A	1992. 1	67.1	63.1	6.5×10^6	59.0	61.9	9.3×10^6
		1996. 2	62.4	57.2	5.7×10^6	55.6	57.6	9.1×10^6
		1996. 6	62.6	58.1	5.6×10^6	55.4	58.0	8.5×10^6
		2001. 11	87.6	73.8	6.1×10^6	62.0	75.3	6.5×10^6
	B	1996. 1	64.6	60.8	5.9×10^6	58.6	61.1	8.7×10^6
		1996. 7	64.2	60.8	5.6×10^6	57.9	60.2	8.7×10^6
		2000. 8	78.4	72.5	5.7×10^6	67.5	71.1	9.1×10^6

Table 5 Evaluation results for CCW Hx.

호기		항목	단위	계산값	판정기준
K3	A	Q	Btu/hr	58,613,129	>64,561,624
		Ut	$Btu/ft^2°Fhr$	226	> 227
		$U_tA/U_{t0}A_0$	-	0.878	> 0.9
		FF	-	0.001925	< 0.002151
	B	Q	Btu/hr	73,747,803	>64,561,624
		Ut	$Btu/ft^2°Fhr$	282	> 227
		$U_tA/U_{t0}A_0$	-	1.101	> 0.9
		FF	-	0.000968	< 0.002151
K4	A	Q	Btu/hr	82,513,663	>64,561,624
		Ut	$Btu/ft^2°Fhr$	324	> 227
		$U_tA/U_{t0}A_0$	-	1.257	> 0.9
		FF	-	0.000581	< 0.002151
	B	Q	Btu/hr	31,521,187	>64,561,624
		Ut	$Btu/ft^2°Fhr$	251	> 227
		$U_tA/U_{t0}A_0$	-	0.941	> 0.9
		FF	-	0.001488	< 0.002151

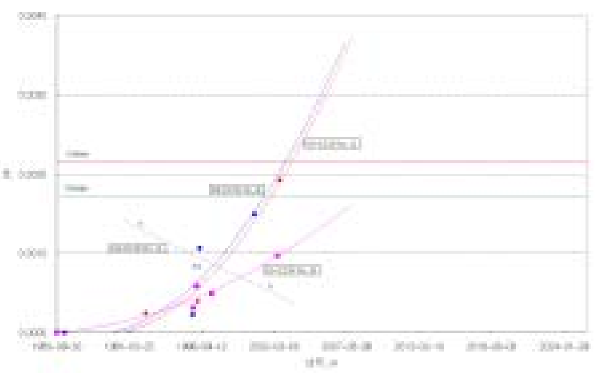

Fig. 4 Fouling evaluation results for CCW Hx.

그림 4는 평가결과로 확인된 Fouling Factor를 허용기준 및 설계값과 현재의 오염정도를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 오염진행 추이로 볼 때 K-3 기기냉각수 열교환기 B와 K-4 기기냉각수 열교환기 A는 향후 10년 운전에 큰 무리가 없는 것으로 나타났으며 나머지 열교환기는 2002년 현재 시점에서 허용기준을 만족하고 있는 것으로 평가되었다. 참고로 K-3호기와 K-4호기 기기냉각수 열교환기 A와 B의 관막음 개수는 평균 50여개로서 현재까지 관막음에 대한 여유가 있으며 평가에는 상기의 관막음된 전열관 면적을 모두 반영하였다.

4. 결 론

국내 특정 2개 원전을 대상으로 화학 및 체적 제어계통의 재생 열교환기 2개와 기기냉각수계통의 기기냉각수 열교환기 4개를 대상으로 Fouling 평가를 수행하였다.

재생 열교환기 평가결과, K-3 및 K-4호기 재생 열교환기는 2002년 현재 ASME OM 코드에서 제시하고 있는 허용기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다. Fouling 관점에서 평가한 오염정도 역시 K-3 및 K-4호기 모두 허용기준에 부합하는 것으로 계산되었다.

기기냉각수 열교환기 평가결과, 열교환기 모두 ASME OM 코드의 허용기준을 만족하고 있거나 안전상에 큰 문제점은 없는 것으로 평가되었다. 그러나 향후 고리3,4호기 PSR 수행과정 등에서 정밀 분석이 요구된다. Fouling 관점에서는 2002년을 기준으로 할 경우 허용기준을 모두 만족하는 것으로 평가되었으며 향후 10년 운전을 가정할 때는 K-3호기 B와 K-4호기 A 열교환기가 허용기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

후 기

본 열교환기 성능평가를 위해 많은 협조를 해주신 한수원(주) 정태상 과장님과 최연우 대리님께 감사드립니다.

참고문헌

(1) J. E. Conklin, 1995, Aging Management Evaluation for Heat Exchangers, WCAP-14341, Westinghouse Owner's Group.

(2) Perry and Green, Chemical Engineer's Handbook, Sixth Edition, McGraw Hill.

(3) ASME, 1994, Standards and Guides for Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants, ASME OM-S/G-Part 2.