

원전 열교환기 Fouling 평가

Fouling Analyses for Heat Exchangers of NPP

황경모, 진태은

한국전력기술주식회사
경기도 용인시 구성면 마북리 360-9

박준현, 정일석

한국전력공사, 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

이보연

한국전력공사, 고리원자력 1발전소
부산광역시 기장군 장안읍 고리 216

요 약

원전 열교환기의 운전년수가 증가함에 따라 공기에서 발생한 입자나 부식생성물, 물에 부유하는 이물질 등이 열교환기 유로정체 부위에 침적되어 유체 흐름을 방해하고 궁극적으로 열 성능을 저하시키는 현상을 Fouling이라 한다. 이러한 Fouling 현상을 평가하기 위하여 본 고에서는 Fouling Factor를 도입하고 국내 특정 원전 1차측 3개 열교환기의 현재 열성능과 오염진행 정도를 예측한다. Fouling 평가는 원전 1차측의 계통 및 운전특성에 따른 오염진행 정도를 비교해 보기 위하여 잔열제거계통의 잔열제거 열교환기, 화학 및 체적제어계통의 유출 열교환기, 기기냉각계통의 기기냉각수 열교환기를 대상으로 수행하였으며, 현재의 오염 정도를 ASME O&M 코드에서 제시하고 있는 허용기준과 비교하였다.

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. This fouling is known to interfere with normal flow characteristics and reduce thermal efficiencies of heat exchangers. In order to analyze the fouling for heat exchangers of nuclear power plant, the fouling factor is introduced based on the ASME O&M codes and TEMA standards. This paper focuses on the fouling analyses for the heat exchangers of several primary systems; the RHR heat exchanger of the residual heat removal system, the letdown heat exchanger of the chemical and volume control system, and the CCW heat exchanger of the component cooling water system. Based on the results of the fouling analyses, the present thermal performances and fouling levels for the three heat exchangers are assumed.

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 공기에서 발생한 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 Fouling이라고 정의한다. 열교환기에서 Fouling이 주로 발생하는 부위는 유동이 정체되거나 저속으로 흐르는 고정관관과 전열관 연결부, 배플과 전열관 사이 등이다.

국내에서는 원전 1차계통 열교환기를 대상으로 열성능 관점에서 열전달계수와 열전달량 등을 비교하여 계속운전 가능성을 평가한 사례는 있지만 Fouling 관점에서 열교환기의 현재 오염진행 정도와 코드 허용기준에 근거한 잔여수명을 예측하고 그 결과로부터 적절한 노화관리 방안을 제시하는 방식의 평가사례는 전무한 실정이다. 이에 따라 본 고에서는 Fouling Factor를 이용하여 열교환기의 건전성 및 오염정도를 예측하는 이론과 국내 특정 원전 1차측 3개계통 3개 열교환기를 평가한 결과를 제시한다. 본 고에서 Fouling 평가를 수행하는 대상 열교환기는 잔열제거계통의 잔열제거(RHR : Residual Heat Removal) 열교환기, 화학 및 체적제어계통의 유출(Letdown) 열교환기 그리고 기기냉각계통의 기기냉각수(CCW : Component Cooling Water) 열교환기이다. 상기 열교환기는 계통별, 운전조건별로 고유의 특성이 있기 때문에 각각의 특성별로 오염정도를 비교하고 개별 열교환기의 건전성 유지 및 효율적인 노화관리방안 수립 관점에서 Fouling 평가를 수행한다.

2. 평가이론 및 방법

열교환기에서 일반적으로 발생하는 Fouling은 물 속에 부유하는 다공성 불용물질 즉, 공기에서 발생한 입자, 부식 생성물, 물에 떠 다니는 실트, 점토, 모래, 유기물질과 미생물, 경수에 포함된 칼슘 침전물, 반응도 조절을 위해 사용되는 붕소 침전물 등으로 인해 발생한다 [1]. 열교환기에서 Fouling이 발생하는 부위는 유동이 정체되거나 저속으로 흐르는 고정관관과 전열관 연결부, 배플과 전열관 사이에서 주로 발생된다. 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 수행중에 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
- C_{p_p}, C_{p_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/ft³
- μ_p, μ_c : 공정수 및 냉각수 점도, lbf sec/ft
- 기타 열교환기 기하학 데이터

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

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

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

여기서, Q_p 와 Q_c (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 열교환기 등)에 실제 향류조건에서 벗어나는 편차를 고려하기 위하여 아래 식과 같이 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≠1인 경우에는 식 (6)을 사용하고 R=1인 경우에는 식 (7)을 사용한다.

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

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

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-ft²-°F)를 나타내고 A_o는 외부표면 기준 전 유효 표면적(ft²)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[2].

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

여기서, NTU는 식 (8)과 식 (9)에 제시된 R와 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 Fouling 정도를 판단할 수 있도록 Fouling Factor를 도입한다. Fouling Factor, r_t는 총괄 열전달계수 계산 식 (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_o : 외부표면 기준 외부 열전달계수, Btu/hr-ft²-°F

h_i : 내부표면 기준 내부 열전달계수, Btu/hr-ft²-°F

r_t : 외부표면 기준 전체 오염저항, hr-ft²-°F/Btu

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

r_o : 외부표면 기준 외부 오염저항, hr-ft²-°F/Btu
 r_i : 내부표면 기준 내부 오염저항, hr-ft²-°F/Btu
 r_w : 설계사고 조건에서 외부표면 기준 관벽저항, hr-ft²-°F/Btu
 A_o : 외부표면 기준 외부 유효표면적, ft²
 A_i : 내부표면 기준 내부 유효표면적, ft²
 E_f : 가중 핀효율(핀이 없을 경우 1, 핀이 있는 경우 1 이하)

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.

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

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

여기서, k : 전열관측 유체의 벌크 열전도도, Btu/hr-ft-°F

d_i : 전열관 내경, in

Re : 전열관측 유체의 무차원 Reynolds Number

$$Re = \frac{124 \rho V d_i}{\mu} \quad (18)$$

Pr : 전열관측 유체의 무차원 Prandtl Number

$$Pr = \frac{2.42 Cp \mu d_i}{k} \quad (19)$$

μ : 전열관측 유체의 벌크 절대점도, cP

μ_w : 전열관벽 온도에서 전열관측 유체의 벌크 절대점도, cP

L : 전열관 전체길이, in

ρ : 전열관측 유체의 벌크 밀도, lb/ft³

V : 유량과 교차유동 단면적에 근거한 전열관 내 유속, ft/sec

외부표면 기준 외부 열전달계수는 식 (20)을 이용하여 계산한다[3].

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

여기서, h_k : 동체측 열전달계수

J_c : 배플형상 보정계수

J_l : 배플 누설효과 보정계수

J_b : 전열관 다발 우회효과 보정계수

J_r : 역온도구배 누적(Adverse Temperature-gradient Buildup) 보정계수

상기 식을 이용하여 외부 열전달계수를 계산하기 위해서는 우선 동체측으로 흐르는 유체의 Re 수를 계산해야 한다. 동체측으로 흐르는 유체의 Re 수는 식 (21)을 이용하여 계산한다.

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

여기서, W : 질량유량, lb/sec

μ_b : 벌크온도에서의 점도, lb/ft-sec

S_m : 전열관 배열에 대한 보정계수

- 사각배열인 경우,

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

- 삼각배열인 경우

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

여기서, l_s : 배플 사이의 거리, in

- D_s : 동체 내경, in
- D_{od} : 전열관 다발 외경, in
- D_o : 전열관 외경, in
- p_n : 유체 흐름방향에 수직인 전열관 피치, in

식 (21)에서 계산된 Re수로부터 전열관 배열 보정계수, J_k 를 확인한다. 이는 그림 1에서 확인할 수 있다.

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

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

- 여기서, C : 동체측 유체의 비열, Btu/lb_m-°F
- k : 동체측 유체의 열전도도, Btu/hr-ft-°F
- μ_w : 평균 표면온도에서의 점도, lb/ft-sec
- μ_b : 벌크유체 점도, lb/ft-sec

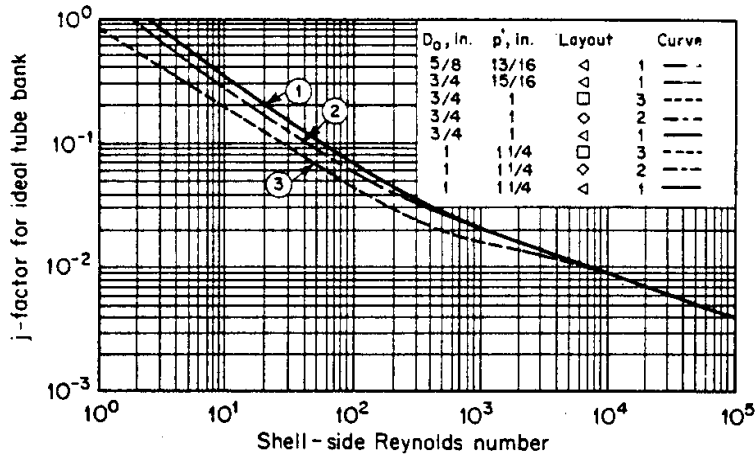


그림 1. 전열관 배열 보정계수

배플형상에 대한 보정계수, j_c 는 그림 2에서 확인할 수 있다. 본 그림을 이용하기 위해서는 교차유로에서 전체 전열관의 비율이 계산되어야 한다. 이는 식 (25)를 이용하여 계산할 수 있다.

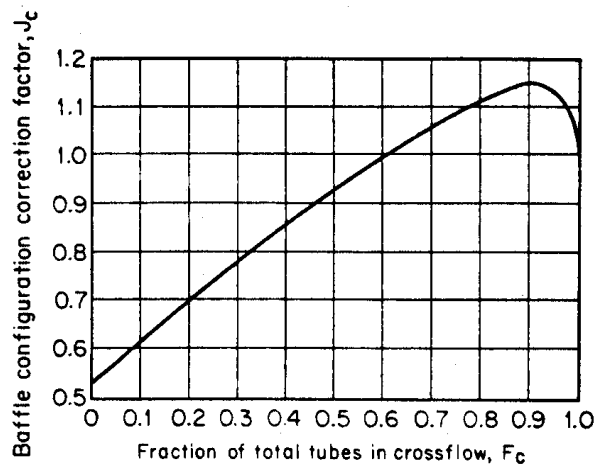


그림 2. 배플형상에 대한 보정계수

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

여기서, l_c : 배플컷, in

배플 누설효과에 대한 보정계수, j_i 은 그림 3에서 확인할 수 있다. 그림 3을 이용하기 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_m 은 식 (22)와 식 (23)으로 계산할 수 있다.

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

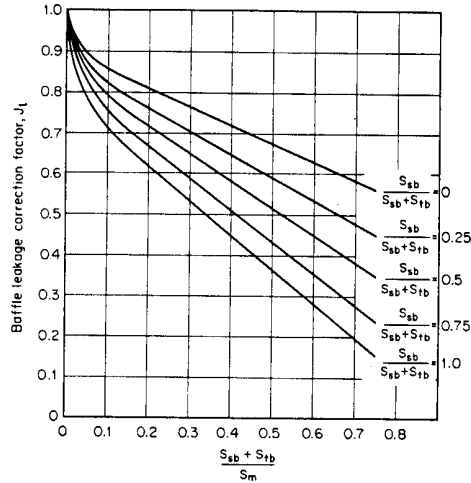


그림 3. 배플 누설효과 보정계수

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

여기서, $\cos^{-1}(1-2l_c/D_s)$: 0 ~ $\pi/2$ 사이의 라디안

δ_{sb} : 동체-배플 사이의 틈(Clearance)으로서 동체의 직경이 24인치 이상인 경우에는 Rolled-shell 사양을 사용해야 함

b : 6.223×10^{-4} (SI 단위인 경우), 1.701×10^{-4} (US Customary인 경우)

N_T : 전체 전열관수

F_C : 식 (25) 또는 그림 4 활용

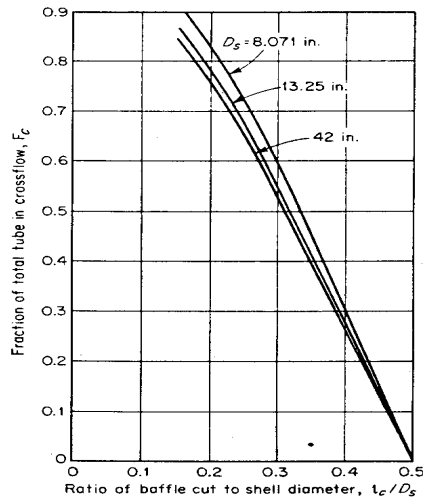


그림 4. 교차유로 전열관 비율

전열관 다발 우회효과(Bundle-bypassing Effects)에 대한 보정계수(J_b)는 그림 5에서 확인할 수 있다. 그림 5에서 N_{ss} 는 밀봉 스트립(Sealing Strips)의 개수를 나타내며, N_c 는 교차유동 영역 내의 전열관 개수를 나타낸다. 그리고 우회흐름에 대한 교차유동 단면적 비율, F_{bp} 는 식 (28)로 계산이 가능하다.

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

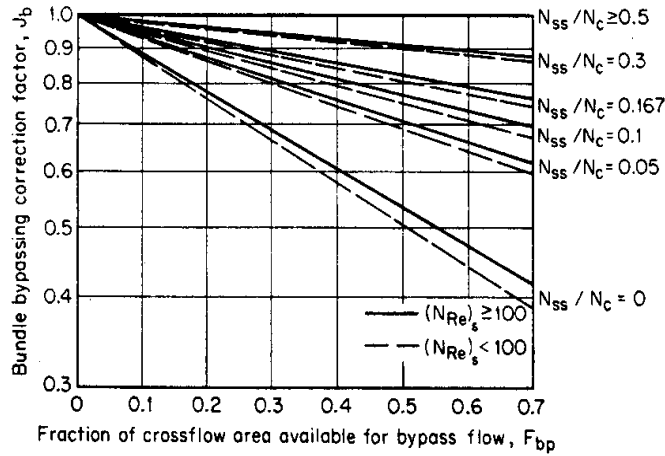


그림 5. 전열관 다발 우회효과 보정계수

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

r_w 는 설계사조 조건에서 외부표면 기준 관벽저항으로서 식 (29)로 계산이 가능하다[4].

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

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 Fouling Factor 계산이 완료되면 평가가 수행되는 해당 열교환기의 오염정도는 어느 정도까지 진행되고 허용기준에 만족하는지를 결정해야 한다. 열교환기의 열교환 성능에 관련된 허용기준은 표 1에 제시하였다[5]. 열교환기의 오염정도를 결정하는데 사용되는 Fouling Factor의 허용기준은 총괄 열전달계수를 환산함으로써 추정이 가능하다. Fouling Factor의 허용기준과 평가시점의 Fouling Factor를 비교함으로써 열교환기 오염측면에서의 오염 진행정도와 잔여수명을 추정할 수 있으며, 이로부터 노화관리(청소) 필요성과 최적의 노화관리 시점 및 주기를 결정할 수 있다.

표 1. 열교환기 운전 허용기준

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-°C

[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. Fouling 평가결과

본 고에서 원전 1차계통 열교환기의 Fouling 평가는 각 계통별 열교환기의 특성을 비교/검토해 보기 위하여 국내 특정 원전의 잔열제거계통, 화학 및 체적제어계통, 기기냉각수계통의 3개 열교환기를 대상으로 수행하였다.

3.1 잔열제거 열교환기

본 고에서 대상으로 하는 원전의 잔열제거 열교환기는 동체측으로 흐르는 기기냉각수가 1회에 걸쳐 통과하고 전열관측으로 흐르는 원자로 냉각재가 동체 내에서 2회에 걸쳐 통과하는 1-2 Pass 열교환기이다. 잔열제거 열교환기는 원자로 냉각 및 핵연료 재장전 동안 원자로 냉각재의 온도를 정지냉각 온도로 감소시키기 위해 원자로 냉각재계통에서 기기냉각수계통으로 열을 전달하고 발전소가 재기동될 때까지 정지냉각 온도로 유지시키는 역할을 하기 때문에 정상운전 중에는 작동하지 않는다. 이에 따라 Fouling 평가를 위한 입력 데이터는 계획예방정비(O/H)를 위하여 원자로를 냉각하는 시점의 값들이다. 일반적으로 잔열제거 열교환기는 2기가 평행하게 설치되어 있으므로 1기의 열교환기를 대상으로 한 평가결과만으로도 다른 열교환기의 상태를 추정할 수 있다. 그림 6은 Fouling 평가를 위한 잔열제거 열교환기 관련 계통도를 개략적으로 나타낸 것으로서 평가를 위하여 기본적으로 측정해야 하는 유량(FI) 및 온도(TI, TR) 게이지의 설치부위를 보여준다. 표 2는 취득 데이터로서 데이터 취득은 약 2분 간격으로 8회에 걸쳐 수행되었다. 취득 데이터를 이용한 Fouling 평가시 유량 데이터는 밸브를 설정하여 유량이 일정하게 흐르도록 하기 때문에 평균값을 사용해도 무방하지만 온도 데이터는 잔열제거 열교환기 운전 특성상 특정 시점을 채택하여 평가를 수행해야 한다.

Fouling 평가는 데이터의 신뢰도가 높은 3회의 측정 데이터를 이용하여 평가를 수행하고 평가결과의 평균값을 잔열제거 열교환기 Fouling 정도로 결정하였다. 표 3은 평가결과를 제시한 것으로서 Fouling 허용기준 및 설계값과 비교하여 현재와 설계수명 종료시점의 Fouling Factor를 나타내었으며, 설계시 고려한 오염정도를 100%로 하여 현재 및 설계수명 종료시점의 오염정도를 백분율로 나타내었다. 그림 7은 평가결과로 확인된 Fouling Factor를 허용기준 및 설계값과 현재의 오염정도를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다.

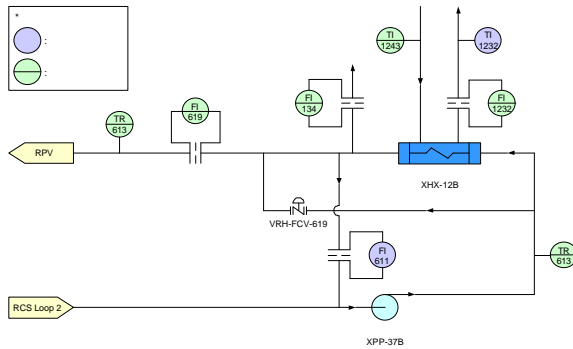


그림 6. 잔열제거 열교환기 계통도

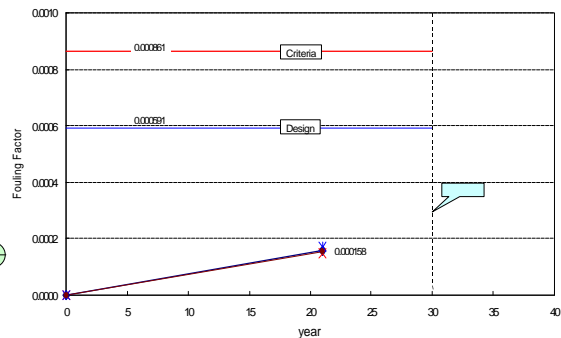


그림 7. 잔열제거 열교환기 평가 그래프

3.2 유출 열교환기

유출 열교환기는 동체측으로 흐르는 기기냉각수가 2회에 걸쳐 통과하고 전열관측으로 흐르는 원자로 냉각재가 동체 내에서 4회에 걸쳐 통과하는 2-4 Pass 열교환기이다. 유출 열교환기는 동체측에서 배출되는 원자로 냉각재를 혼상 탈염기(Mixed Bed Demineralizer)의 운전온도까지 냉각시키는 역할을 하기 때문에 정상 운전중에도 작동한다. 따라서 Fouling 평가를 위한 운전 데이터는 원자로가 정상운전 중일 때의 값들이다. 그림 8은 Fouling 평가를 위한 유출 열교환기 관련 계통도를 개략적으로 나타낸 것으로서 평가를 위하여 기본적으로 측정해야 하는 유량(FI) 및 온도(TI) 게이지의 설치부위를 보여준다. 표 4는 취득 데이터로서 데이터의 변화는 거의 없지만 평가결과의 정확성을 위하여 약 1분 간격으로 10회에 걸쳐 취득하였으며, 평가에는 평균값을 적용하였다.

표 2. 잔열제거 열교환기 B 취득 데이터

유체명	변수	Gage	1회	3회	8회	평균
공정수	입구온도, °C	TR-613	90.0	89.3	88.3	
	출구온도, °C	TR-613	61.7	61.4	60.9	
	전유량, m ³ /hr	FI-619	415	415	415	
	누수, m ³ /hr	FI-134	14.5	14.5	14.5	
	역류, m ³ /hr	FI-611	24.7	24.9	24.8	24.8
	Hx유량, m ³ /hr	계산	375.8	375.6	375.7	375.6
냉각수	입구온도, °C	TI-1243	32.0	32.0	32.0	
	출구온도, °C	TI-1232	59.8	59.2	58.9	
	유량, m ³ /hr	FI-1232	570	570	570	570

표 3. 잔열제거 열교환기 평가결과 요약

항 목	Fouling Factor	설계대비 오염정도, %	비 고
Criteria	0.00086	-	총괄 열전달계수의 90%
설계값	0.00059	100	설계시 고려한 오염정도를 기준
현재(1999)	0.00015	25.4	
설계수명 종료시점	0.00020	33.9	

표 5는 평가결과를 제시한 것으로서 Fouling 허용기준 및 설계값과 비교하여 현재와 설계수명 종료시점의 Fouling Factor를 나타내었으며, 설계시 고려한 오염정도를 100%로 하여 현재 및 설계수명 종료시점의 오염정도를 백분율로 나타내었다. 그림 9는 평가결과로 확인된 Fouling Factor를 허용기준 및 설계값과 현재의 오염정도를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 평가결과 대상 원전의 유출 열교환기는 거의 오염이 되지 않은 것으로 확인되었다.

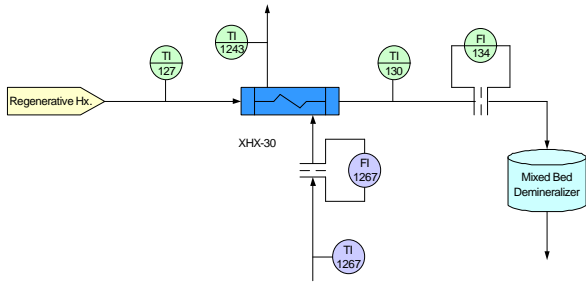


그림 8. 유출 열교환기 계통도

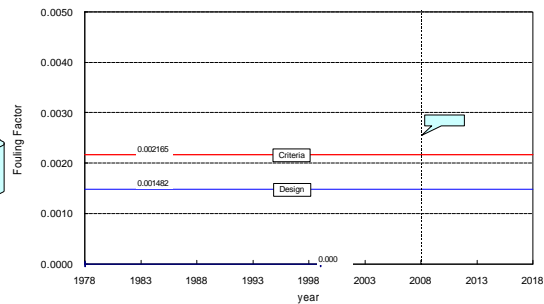


그림 9. 유출 열교환기 평가 그래프

표 4. 유출 열교환기 취득 데이터

유체명	변수	Gage	1회	2회	생략	10회	평균
공정수	입구온도, °C	TI-127	122.0	122.0	...	122.0	122.0
	출구온도, °C	TI-130	30.2	30.2	...	30.2	30.2
	유량, m ³ /hr	FI-134	17.5	17.5	...	17.5	17.5
기기 냉각수	입구온도, °C	TI-1243	18.2	18.2	...	18.2	18.2
	출구온도, °C	TI-1267	22.2	22.2	...	22.2	22.2
	유량, m ³ /hr	FI-1267	94.0	95.0	...	94.0	94.1

표 5. 유출 열교환기 평가결과 요약

항 목	Fouling Factor	설계대비 오염정도, %	비 고
Criteria	0.002165	-	총괄 열전달계수의 90%
설계값	0.001482	100	설계시 고려한 오염정도 기준
현재(1999)	0.000000	0.0	정상운전
설계수명 종료시점	0.000000	0.0	

3.3 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 발생하는 열을 해수계통으로 전달하는 역할을 하기 때문에 정상운전 중에 항상 작동한다. 따라서 Fouling 평가를 위한 운전 데이터는 정상운전 중일 때의 값들이다. 기기냉각수 열교환기는 그림 10에서 볼 수 있듯이 A, B, C, D 4기가 있지만 서로 유사한 운전특성을 갖고 있기 때문에 본 고에서는 대표적으로 열교환기 B를 대상으로 평가한 결과를 제시한다. 본 고에서 대상으로 하는 원전의 기기냉각수 열교환기는

8년 정도 운전 후 전열관을 전면 교체한 바 있고 주기적으로 전열관과 열교환기 연결배관을 청소하고 있지만 전열관과 고정관 사이와 같은 부위에서 누적되는 이물질이 100% 제거되지 않는다. 따라서 열교환기의 오염정도는 운전년수 증가에 따라 지속적으로 증가한다. 그림 10은 Fouling 평가를 위한 기기냉각수 열교환기 관련 계통도를 개략적으로 나타낸 것으로서 평가를 위하여 기본적으로 측정해야 하는 유량(FI) 및 온도(TI) 게이지의 설치부위를 보여준다. 기기냉각수 열교환기로 유입되는 기기냉각 해수계통에는 유량측정용 게이지가 설치되어 있지 않기 때문에 해수유량 취득을 위해서는 유량 측정기기를 사용해야 하며, 기기냉각수 유량을 취득하기 위해서는 배관에 연결된 밸브를 조절하여 해당 기기냉각수 열교환기만을 통과하는 유량을 측정해야 한다. 표 6은 기기냉각수 열교환기 B에 대하여 일정시간 동안 취득한 데이터를 평균한 값으로서 이를 Fouling 평가에 적용하였다.

표 7은 평가결과를 제시한 것으로서 Fouling 허용기준 및 설계값과 비교하여 현재와 설계수명 종료시점의 Fouling Factor를 나타내었으며, 설계시 고려한 오염정도를 100% 하여 현재 및 설계수명 종료시점의 오염정도를 백분율로 나타내었다. 그림 11은 평가결과로 확인된 Fouling Factor를 허용기준 및 설계값과 현재의 오염정도를 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 평가결과 대상 원전의 기기냉각수 열교환기 B는 상업운전 이후 8년 경 전열관을 전면 교체한 바 있으며, 1999년 Fouling 평가를 위한 데이터 취득시점 전에 해당 열교환기를 전반적으로 청소를 한 결과 열교환기의 오염정도는 예상보다 심하지 않은 것으로 확인되었다. 참고로 기기냉각수 열교환기 B의 관막음된 전열관 개수는 4개이며, 이는 평가에 반영되었다.

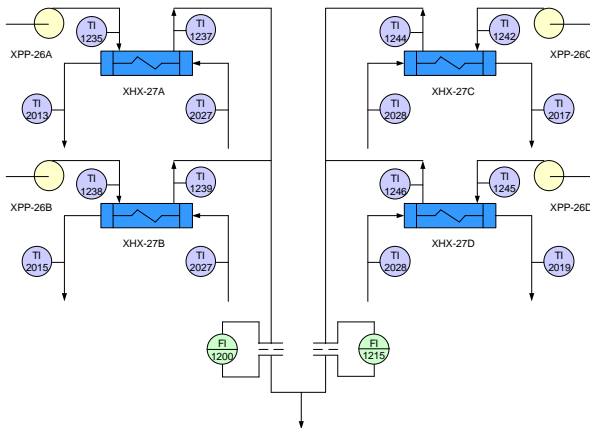


그림 10. 기기냉각수 열교환기 계통도

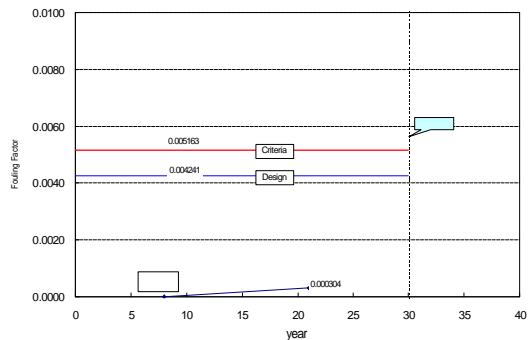


그림 11. CCW 열교환기 B 평가 그래프

표 6. 기기냉각수 열교환기 취득 데이터

열교환기 종류	측정변수	기기냉각수 (평균값)	해수 (평균값)
B	입구온도, °C	26.60	22.00
	출구온도, °C	23.40	24.20
	유량, m ³ /hr	500.00	997.03

표 7. 기기냉각수 열교환기 B 평가결과 요약

Hx. 종류	항 목	Fouling Factor	설계대비 오염정도, %	비 고
B	Criteria	0.005163	-	총괄 열전달계수의 90%
	설계값	0.004309	100	설계시 고려한 오염정도 기준
	현재(1999)	0.000304	7.06	정상운전
	설계수명 종료시점	0.000485	11.26	-

4. 결론

본 고에서는 국내 특정원전을 대상으로 잔열제거계통의 잔열제거 열교환기, 화학 및 체적제어계통의 유출 열교환기, 기기냉각계통의 기기냉각수 열교환기를 대상으로 Fouling 평가를 수행한 결과를 수록하였다.

Fouling 평가 결과, 잔열제거 열교환기의 오염정도는 25.4%(설계대비)인 반면 유출 열교환기의 오염정도는 0.0%인 것으로 확인되었다. 이러한 결과로부터 원자로 정상운전 중에 항

상 작동하는 유출 열교환기는 거의 오염이 진행되지 않은 것을 확인할 수 있으며, 원자로 냉각 및 핵연료 재장전 동안 원자로 냉각재의 온도를 정지냉각 온도로 감소시키기 위해 약 1년에 한 번 정도만 운전되는 잔열제거 열교환기는 상대적으로 오염이 많이 진행된 것을 알 수 있다. 이로부터 원전 1차측에 사용되는 열교환기의 오염은 주로 반응도 조절을 위해 사용되는 원자로 냉각재의 붕소와 기기냉각수의 염소나 아민과 같은 화학물질이 유로정체 또는 건조시 침적되기 때문인 것으로 판단된다. 본 고에서 평가한 잔열제거 열교환기의 오염 정도는 유출 열교환기에 비해 다소 심하기는 하지만 설계수명 2/3를 경과한 1999년 현재 설계시 고려한 Fouling Factor 대비 25.4% 밖에 진행되지 않았기 때문에 열교환기 자체 열성능에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 결론지을 수 있다. 또한 Fouling Factor를 설계수명 종료시점까지 연장할 경우에도 설계대비 오염정도는 33.9% 정도이므로 Fouling 측면에서는 특별한 노화관리 프로그램이 수행되지 않아도 될 것으로 판단된다.

한편, 기기냉각수 열교환기 B는 전열관측으로 천연수인 해수가 통과하고 동체측으로는 기기냉각수가 통과하기 때문에 타 열교환기에 비해 오염정도가 심할 것으로 예상되지만 본 고를 통하여 평가한 기기냉각수 열교환기는 상업운전 이후 8년 경 전열관을 전면 교체한 바 있으며, Fouling 평가를 위한 데이터 취득시점 전에 해당 열교환기를 전반적으로 청소를 한 결과 열교환기의 오염정도는 설계시 고려한 Fouling Factor 대비 7.06%로서 예상보다 심하지 않은 것으로 확인되었다. 그러나 기기냉각수 열교환기 내부로는 수처리를 하지 않은 천연수가 통과하기 때문에 열교환기 열효율 및 기기 건전성 유지를 위한 지속적인 관심을 가져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. J. E. Conklin, Aging Management Evaluation for Heat Exchangers, WCAP-14341, Westinghouse Owner's Group, 1995.
2. ASME, Standards and Guides for Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants, ASME OM-S/G-Part 21, 1994.
3. Perry and Green, Chemical Engineer's Handbook, Sixth Edition, McGraw Hill.
4. TEMA, Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, Seventh Edition, 1988.
5. ASME, Standards and Guides for Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants, ASME OM-S/G-Part 2, 1994.