다관원통형 열교환기의 파울링 및 관막음 여유 평가법 개발 연구

황경모[†]· 진태은[*]

A Study on the Development of Fouling and Plugging Margin Evaluation Methods for Shell-and-Tube Heat Exchangers

Kyeong Mo Hwang and Tae Eun Jin

Key Words: Fouling Factor(오염계수), Plugging(관막음), Overall Heat Transfer Coefficient(총괄열전달계수)

Abstract

As operating time of heat exchangers progresses, fouling generated by water-borne deposits increases and thermal performance decreases. The fouling is known to interfere with normal flow characteristics and reduce thermal efficiencies of heat exchangers. The heat exchangers of nuclear power plants have been analyzed in terms of the heat flux and heat transfer coefficient at test conditions based on the ASME OM-S/G-Part 2 as a means of heat exchanger management. It is hard to estimate the heat performance trend and to establish the future management plan. This paper describes the fouling evaluation method which can evaluate the thermal performance for heat exchangers and estimate the future fouling variations and the plugging margin evaluation method which can reflect the current fouling level developed in this study. To develop the fouling and plugging margin evaluation methods for heat exchangers, fouling factor was introduced based on the ASME O&M codes and TEMA standards. For the purpose of verifying the two evaluation methods, the fouling and plugging margin evaluations were performed for a component cooling heat exchanger in a nuclear power plant.

1. 서 론

열교환기의 고유기능은 온도, 압력 및 성분이 다른 두 유체를 분리된 상태에서 열교환하여 계통특성에 맞도록 유체온도를 저하 또는 상승시키는 것이다. 원전에서는 저온수 주입에 의한 열응력 최소화, 원자로 안전정지, 열효율 증가, 주요 건물 내부의 적정온도 유지, 최종 열제거 등 다양한 목적에 맞게 다양한 열교환기가 사용되고 있다. 이러한 열교환기 대부분은 가동년수 증가에 따라 오염이 증가하고 감육, 균열, 누설 등으로 인한 관막음 개수가 증가한다. 기존 발전소에서는 열교환기 관리방안으로 ASME OM-S/G-Part 2[(1)]에 따라 평가시점에서 열전달량과 열전달계수 측면에서만 분석해 왔다. 이러한 경우 발전소 특성상 수년에 한 번씩 실시하는 평가시점에서의 상태만 파악할 수 있을 뿐 오염과 성능변화 추이를 파악하기 어렵고 청소, 정비, 교체 등의 효율적인 열교환기 관리계획 수립이 용이하지도 않다. 또한 오염진행 정도에 따라 열전달 성능 유지를 위한 전열관 관막음 여유도 줄어들기 때문에 이를 효과적으로 반영하여 평가할 수 있는 방법도 미흡한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 발전소에서 보다 효과적으로 열교환기를 관리할 수 있는 방안으로서 열전달 성능, 열전달계수 외에 오염진행 추이를 분석할 수 있는 파울링 평가법과 현재의 오염정도를 반영할 수 있는 관막음 여유 평가법을 개발하였다. 파울링 평가법과 관막음 여유 평가법 개

---

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

발에는 상변화 없는 열교환기의 열전달계수 검사 방법을 응용하였다. 또한 본 연구에서 개발한 두 가지 평가법을 가동중인 원전의 기기냉각수 열교환기에 적용하여 효용성을 분석하였다.

2. 평가이론 및 방법

2.1 파울링 평가법

열교환기에서 일반적으로 발생하는 파울링은 물 속에 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$^{(2)}$. 이러한 파울링 현상은 열교환기에서 정상 유체흐름을 방해하고 압력손실, 부식 발생원 등의 작용을 하며, 특히 열교환기의 열성능을 저하시킨다. 본 연구에서 제시하는 열교환기 파울링 평가 이론 및 방법은 코일, 핀튜브형 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, ℃
○ t_1, t_2 : 냉각수 입구 및 출구온도, ℃
○ W_p, W_c : 공정수 및 냉각수 유량, kg/hr
○ Cp_p, Cp_c : 공정수 및 냉각수 비열, kcal/kg-℃
○ k_p, k_c : 공정수 및 냉각수 열전도도, kcal/m-hr-℃
○ ρ_p, ρ_c : 공정수 및 냉각수 밀도, kg/m^3
○ 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 계산이 가능하다.

$$Q_p = W_p[Cp_p(T_1 - T_2)] \tag{1}$$

$$Q_c = W_c[Cp_c(t_2 - t_1)] \tag{2}$$

여기서, Q_p와 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.

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

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

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.

$$MTD = LMTD \cdot F \tag{5}$$

여기서, MTD(mean temperature difference)는 보정된 평균 온도차(℃)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≠1인 경우에는 식 (6)을 사용하고 R=1인 경우에는 식 (7)을 적용한다.

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

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

여기서, R과 P는 각각 식 (8), (9)와 같다.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \tag{8}$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \tag{9}$$

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

$$U = \frac{Q}{A_o\ MTD} \tag{10}$$

여기서, U는 외부표면 기준 총괄열전달계수(kcal/hr-m^2-℃)를 나타내고 A_o는 외부표면 기준 외부 유효표면적(m^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 총괄열전달계수를 계산한다.

$$U = \frac{NTU\ W_c Cp_c}{A_o} \tag{11}$$

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.

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

여기서, k_t는 전열관측 유체의 열전도도(kcal/hr-m-℃), d_i는 전열관 내경(m), μ_b는 전열관측 유체의 절대점도(Pa-sec), μ_w는 전열관벽 온도에서 전열관측 유체의 절대점도(Pa-sec), L은 전열관 전체길이(m), ρ_t는 전열관측 유체의 밀도(kg/m^3), 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.

$$Re = \frac{124\, \rho_t\, V\, d_i}{\mu_b} \qquad (18)$$

$$Pr = \frac{2.42\, Cp_t\, \mu_b}{k_t} \qquad (19)$$

외부표면 기준 외부 열전달계수(h_0)는 식 (20)을 이용하여 계산한다[3].

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

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.

$$Re_s = \frac{d_o\, W}{\mu_{bs}\, S_m} \qquad (21)$$

여기서, μ_{bs}는 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.

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

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

여기서, l_s는 배플 사이의 거리(m), D_s는 동체 내경(m), D_{otl}은 전열관 다발 외경(m), d_o는 전열관 외경(m) 그리고 p_n은 유체 흐름방향에 수직인 전열관 피치(m)를 나타낸다. 식 (21)에서 계산된 Re수로부터 전열관 배열 보정계수(j_k)는 관련 핸드북[3]에서 확인할 수 있다.

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

$$h_k = j_k\, Cp_s \frac{W}{S_m}\left(\frac{k_s}{Cp_s\, \mu_s}\right)^{2/3}\left(\frac{\mu_{bs}}{\mu_{ws}}\right)^{0.14} \qquad (24)$$

여기서, Cp_s는 동체측 유체의 비열(kcal/kg-℃), μ_{ws}는 전열관 외부표면 온도에서 동체측 유체의 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.

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

여기서, l_c는 배플컷(m)을 나타낸다.

배플 누설효과에 대한 보정계수(J_l)를 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.

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

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

여기서, $\cos^{-1}(1-2l_c/D_s)$는 0 ~ π/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 British 단위인 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.

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

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(4).

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

여기서, k는 전열관의 열전도도(Kcal/hr-m-℃)를 나타내며 t는 전열관벽의 두께(m)를 나타낸다. 이와 같이 모든 변수에 대한 계산이 완료되면 식 (30)으로부터 전열관 내부 및 외부의 오염저항이 모두 고려된 전체 오염계수를 계산할 수 있다.

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

이러한 오염계수는 열교환기의 전열성능을 저하시키는 정도를 나타내기 때문에 운전년수 증가에 따라 증가할 것으로 예상되며, 주기적으로 관찰할 경우 열교환기의 성능변화 추이도 예측할 수 있다.

2.2 관막음 여유 평가법

열교환기 관막음 여유를 계산하기 위해서는 열교환기 계통 설계시 반영된 여유도와 제작시 반영된 여유도를 계산해야 한다. 결과적으로 관막음 여유도(α)는 아래 식과 같이 계통설계 여유도(α_s)와 제작 여유도(α_m)를 더한 값이다.

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_m \qquad (31)$$

열교환기의 계통설계 여유율을 계산하기 위해서는 설계시 반영한 과도상태를 확인해야 한다. 일반적으로 재순환계통 열교환기 설계에 반영되는 운전조건으로는 Plant Stratup, Normal Operation, Shutdown, Refueling, Recirculation, Safety Injection 등이 있다. 이들 중 설계조건을 결정할 때 사용된 Plant Startup 시의 $(UA_o)_s$를 실제 설계에 반영된 $(UA_o)_d$와 비교함으로써 식 (32)와 같이 계통설계 여유율을 구할 수 있다.

$$\alpha_s = 100\times\left(\frac{(UA_o)_d}{(UA_o)_s} - 1\right) \qquad (32)$$

여기서, $(UA_o)_s$와 $(UA_o)_d$는 모두 식 (10)으로부터 구할 수 있다.

열교환기 제작 여유도는 식 (33)과 같이 실제 열교환기 제작시의 전열면적($A_{o,m}$)을 필요 전열면적($A_{o,r}$)과 비교함으로써 구할 수 있다.

$$\alpha_m = 100\times\left(\frac{A_{o,m}}{A_{o,r}} - 1\right) \qquad (33)$$

이 때 평가시점까지의 오염된 정도를 반영하기 위해서는 제작시 필요 전열면적 계산에 사용된 오염계수 대신에 현재의 오염계수를 적용하면 된다. 일반적으로 열교환기 제작시의 전열면적은 기기시방서에 제시되어 있으며, 필요 전열면적은 식 (34)를 이용하여 구할 수 있다.

$$A_{o,r} = \frac{Q}{U \cdot MTD} \qquad (34)$$

필요 전열면적을 구하기 위해서는 2.1절에서 제시한 식 (5), (10), (14), (16), (17), (20)을 이용할 수 있다.

2.3 운전 허용기준

ASME OM-S/G-Part 2에는 열교환기의 운전 허용기준으로서 설계유량의 +10% 이하, 설계시 압력강하의 +10% 이하, 설계시 열전달량의 -10% 이상, 설계시 총괄열전달계수의 -10%를 제시하고 있다(4). 일반적으로 열교환기는 운전년수가 증가함에 따라 전열관 내외벽의 오염증가에 따라 열전달 성능이 저하되며, 진동, 유동가속부식, 응력부식균열 등에 따른 균열로 인하여 관막음 개수가 증가한다. 이에 따라 ASME OM-S/G-Part 2에서 제시한 운전 허용기준 이외에 오염정도와 관막음 여유에 대한 허용기준을 추가로 설정할 필요성이 있다.

열교환기의 오염정도를 결정하는데 사용되는 오염계수 허용기준은 총괄열전달계수를 환산함으로써 추정이 가능하다. 그리고 관막음 여유도는 계통설계 및 제작시에 고려한 여유도를 관막음 허용기준으로 이용할 수 있다. 이러한 운전 허용기준 중에서 관막음 기준을 제외한 나머지 변수는 열교환기 청소, 정비, 운전조건 변경 등을 통하여 운전수명을 연장시킬 수 있지만 관막음 기준을 초과할 경우에는 전열관을 전면 교체하거나 열교환기 자체를 교체해야 하는 문제도 발생할 수 있기 때문에 중요하게 고려해야 한다.

3. 파울링 및 관막음 여유 평가

본 연구에서 개발한 다관원통형 열교환기의 파울링 평가법과 관막음 여유 평가법을 이용하여 실제 원전에 사용되고 있는 기기냉각수 열교환기의 오염도와 관막음 여유를 평가하였다. 평가대상으로 선정한 기기냉각수 열교환기는 동체측으로 기기냉각수가 1회에 걸쳐 통과하고 전열관측으로 해수가 1회에 걸쳐 통과하는 1-1 pass 대향류 열교환기로서 2000년 시점에서 115개의 전열관이 관막음 된 상태였다. Fig. 1은 원전에 설치되어 있는 기기냉각수 열교환기 관련 계통도를 데이터 취득에 필요한 게이지와 함께 나타내었다.

Table 1은 파울링 및 관막음 여유 평가를 위한 입력 데이터로서 설계 데이터와 과거 3회에 걸쳐 취득한 평균 데이터이다. Table 2와 Fig. 2는 과거 3회의 실측 데이터를 이용하여 파울링 평가를 수행한 결과를 제시한 것이다. Table 2에서 볼 수 있듯이 총괄열전달계수와 비총괄열전달계수(U^*)는 평가 최종시점에서 허용기준을 만족하고 있으나 점차 저하되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 오염계수도 평가 최종시점에서 허용기준을 만족하고 있으나 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 지수함수적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 현재의 추이대로 증가할 경우, 2003년 말경에는 허용기준치를 초과할 것으로 예상된다.

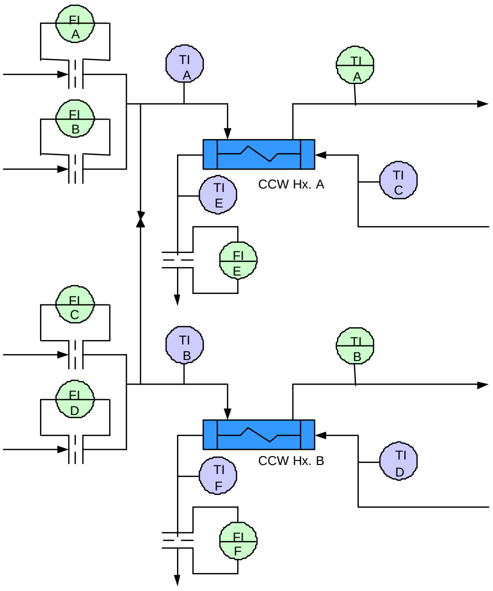

Fig. 1 Flow diagram for CCW Hx.

Table 1 Input data for Evaluation

years	Process Fluid			Cooling Fluid		
	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Flow Rate	Inlet Temp.	Outlet Temp.	Flow Rate
	℃	℃	kg/hr	℃	℃	kg/hr
Design	41.00	35.00	2.95×10^6	28.00	33.39	3.49×10^6
1996. 1	18.11	16.00	2.68×10^6	14.78	16.17	3.95×10^6
1996. 7	17.89	16.00	2.54×10^6	14.39	16.22	3.95×10^6
2000. 8	25.78	22.50	2.59×10^6	19.72	21.72	4.13×10^6

Table 2 Fouling evaluation results

Items	Units	Criteria	1996.1	1996.7	2000.8
r_t	m²℃/W	$\leq 5.2\times10^{-4}$	1.9×10^{-4}	3.4×10^{-4}	4.1×10^{-4}
U	kcal/m²℃ hr	$\geq 1,107$	1,696	1,287	1,224
U^*	-	≥ 0.9	1.36	1.03	0.94

[주] U^* : Specific Overall Heat Transfer Coefficient (UA/U_oA_o)

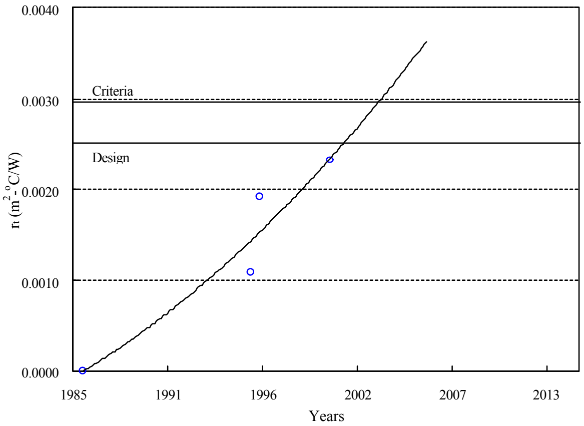

Fig. 2 Fouling evaluation results

Table 3 Plugging Margin evaluation results

Items			Units	Values
Total number of tubes			-	2,100
Heat flux at design			kcal/hr	17.65×10^6
Heat flux at plant startup			kcal/hr	17.64×10^6
Design Margin	$(UA)_d$		kcal/℃·hr	$2,417\times10^3$
	$(UA)_s$		kcal/℃·hr	$2,416\times10^3$
	α_s		%	0.02①
Manufacture Margin	A_m		m²	2,014
	A_r	Manufacture	m²	1,869
		2000 yr	m²	1,917
	α_m	Manufacture	%	7.77
		2000 yr	%	5.05②
α_s(①)+α_m(②)			%	5.07
Plugging Margin of Tubes			Number	110

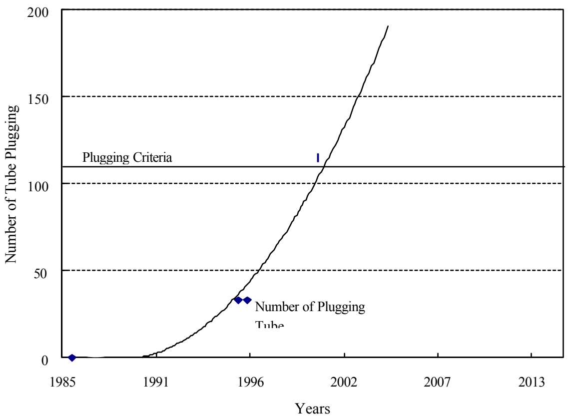

Fig. 3 Plugging Margin evaluation results

Table 3과 Fig. 3은 관막음 여유를 평가한 결과이다. 2000년 시점에서 기기냉각수 열교환기의 계통설계 여유도와 제작 여유도를 합한 전열면적 여유도는 5.07%인 것으로 평가되었으며, 이를 전열관 개수로 환산할 경우에는 전체 2,100개의 전열관 중 110개까지 관막음이 가능한 것으로 평가되었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 2000년 시점에서의 전열관 관막음 개수가 115개이기 때문에 본 평가에서는 관막음 허용기준인 110개를 초과한 것으로 나타났다. 그러나 계통운전 측면에서 즉시 문제가 나타나지만 않는다면 관막음 허용기준을 초과했다고 해서 해당 열교환기의 운전이 불가능하다는 것을 의미하지는 않는다.

결과적으로 평가대상 기기냉각수 열교환기는 오염정도, 성능 및 관막음 여유 측면에서 모두 코드 기준 및 관막음 기준에서 허용치에 근접한 것으로 나타났기 때문에 조만간에 전열관 전면교체와 같은 조치가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 원전에 일반적으로 사용되고 있는 다관원통형 열교환기의 성능과 오염진행 추이를 효율적으로 분석하고 관막음 한계를 분석하기 위하여 파울링 평가법과 관막음 여유 평가법을 개발하였다. 파울링 평가법을 활용할 경우에는 평가시점의 열전달 성능, 총괄열전달계수, 비총괄열전달계수, 파울링 측면의 허용 가능성 외에 오염진행 추이도 분석할 수 있으며, 관막음 여유 평가법으로는 평가시점까지 오염된 정도를 반영한 전열관 관막음 한계를 파악할 수 있다. 이러한 평가기법들은 상변화 없는 모든 다관원통형 열교환기에 적용할 수 있으며, 열교환기의 계속 사용 가능성과 세정, 교체시점 등을 보다 현실적으로 분석할 수 있다.

본 연구에서 개발한 파울링 평가법과 관막음 여유 평가법의 적용 가능성 분석을 위하여 국내 원전에 적용되고 있는 한 개의 기기냉각수 열교환기를 대상으로 평가를 수행하였다. 파울링 평가결과, 총괄열전달계수와 비총괄열전달계수는 평가 최종 시점까지 모두 허용기준을 만족하고 있으나 점차 저하되고 있는 것을 알 수 있었으며, 오염계수도 평가 최종시점에서 허용기준을 만족하고 있으나 오염정도는 점차 증가하고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 관막음 여유 평가결과도 평가 최종시점에서 이미 관막음 한계에 도달한 것으로 평가되었다. 이러한 결과를 종합할 때 평가대상 열교환기는 빠른 시일 내에 전열관 전면교체와 같은 정비계획 수립이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

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

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

(3) R. H. Perry, et. al., *Chemical Engineer's Handbook*, Sixth Edition, McGraw Hill, pp. 10. 24 - 10.31.

(4) TEMA, 1988, *Standards of the Tubular Exchanger Manufactures Association*, 7th Edition, pp. 101 - 104.