

원전 1차측 열교환기 수명평가 및 노화관리방안

Lifetime Evaluations and Aging Management Aspects for Primary Heat Exchangers of NPP

황경모, 진태은

한국전력기술주식회사
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9

박준현, 정일석

한국전력공사, 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

가동중인 원전을 설계수명 이상 최적 경제수명까지 운전하기 위하여 수행하고 있는 수명관리연구의 일환으로 열교환기 수명평가 및 노화관리방안 연구를 수행하였다. 본 고에서 제시하고 있는 내용은 원전 1차측 열교환기 수명평가 및 노화관리방안에 대한 전반적인 수행 방법론, 예비평가 결과에 따라 정밀평가가 필요한 것으로 도출된 열교환기 부속기기별 노화기구에 대한 정밀평가 수행 내용 그리고 평가결과에 따라 수립된 노화관리방안이다. 본 고는 열교환기 수명관리연구를 수행한 전체 내용 중 일부이지만 수행내용과 수명평가 결과를 선별하여 함축적으로 제시하고 있다.

ABSTRACT

Plant Lifetime Management (PLiM) is synthetic technologies for the purpose of extended operation to optimal economic lifetime beyond design life of an operating nuclear power plant. In order to ensure its extended operation, it is necessary to prove the technical safety operation of major systems, structures, and components together with economical benefits. Based on the results of PLiM(I) feasibility study that the extended operation of a domestic nuclear power plant is possible in technical and economical aspects, PLiM(II) detailed evaluation study has been working since 1999. Lifetime evaluations and aging management aspects study for primary heat exchangers described in this paper is included in the PLiM(II) study. This paper describes briefly the overall PLiM procedure for primary side heat exchangers. Also, this paper describes detailed evaluation results for the flow-induced vibration, fouling, and seawater erosion/corrosion. Based on the only detailed evaluation results of the aging mechanisms, the optimal aging management programs are suggested in this paper to maintain the integrity of heat exchangers beyond design life.

1. 서 론

원전수명관리(PLiM)는 가동중인 원전을 설계수명 기간을 포함하여 최적 경제수명까지 운전하기 위한 종합기술이다. 원전을 설계수명 이상 계속운전하기 위해서는 경제적인 이득뿐만 아니라 기술적인 측면에서도 원전을 구성하고 있는 주요 계통, 구조물 및 기기의 안전성과 건전성이 입증되어야 한다. 이에 따라 국내에서는 발전사업자인 한전이 중심이 되어 1단계 원전수명관리 타당성 연구를 수행한 결과 경제적, 기술적 측면에서 계속운전 타당성이

입증되어 현재 2단계 수명관리 정밀평가 연구를 수행하고 있다. 본 고에서 제시하는 열교환기 수명평가 및 노화관리방안 연구도 상기 과제의 일환으로 수행하고 있으며, 원전 안전과 밀접한 연관성이 있는 주요 열교환기 및 부속기기를 선정하여 기술적인 측면에서 건전성을 평가하고 계속운전 기간 동안에도 안전성과 건전성을 유지할 수 있도록 최적의 노화관리방안을 제시하는데 주안점을 두고 있다.

열교환기 수명관리를 위해서는 원전 안전과 밀접한 연관성이 있는 열교환기 선정이 가장 급선무이다. 평가를 필요로 하는 열교환기가 선정되면 다음 단계로 해당 열교환기의 건전성에 영향을 미칠 수 있는 부속기기와 부속기기를 손상시킬 수 있는 노화기구를 선정해야 한다. 수명평가는 해당 열교환기 부속기기의 노화기구별로 수행하며, 수명평가 결과를 바탕으로 설계수명 이후에도 건전성을 유지할 수 있도록 적절한 노화관리방안을 수립한다. 이러한 수명관리 방식은 기존 해외의 수명관리연구 선도수행 원전에서 기 채택한 바 있으며, 현재 세계적으로 널리 적용되고 있는 일반화된 기술이다.

본 고에서는 열교환기 수명관리 수행절차를 간략히 소개하고 예비평가 수행결과로 도출된 정밀평가 필요 노화기구에 대하여 각 노화기구별로 간단한 평가이론과 결과를 소개한다. 그리고 본 고에서 제시한 정밀평가 결과를 바탕으로 설계수명 이후 계속운전시에도 열교환기 고유기능을 유지할 수 있도록 적합한 노화관리방안을 제시한다.

2. 열교환기 수명관리 수행체계

장기간 운전으로 노후화 된 원전을 설계수명 이상의 기간동안 계속운전하기 위해서는 경제적인 이득 외에도 기술적인 측면에서 원전을 구성하고 있는 주요 기기의 안전성과 건전성이 입증되어야만 한다. 이의 일환으로 수행하고 있는 열교환기 수명관리의 목적은 발전소 계속운전시 안전과 밀접한 연관성이 있는 주요 열교환기를 선정하여 기술적인 측면에서 건전성을 평가하기 위함이다. 주요 계통의 열효율 증가, 기기에 미치는 과도한 열응력 저하, 기기에서 발생하는 열 제거 등의 역할을 하도록 설계된 원전 1차계통 열교환기는 종류도 다양할 뿐만 아니라 개수도 수십 여 기에 달하기 때문에 제한된 기간 내에 수명평가를 실시하고 최적의 관리방안을 수립하기 위해서는 보다 체계적인 방법과 절차에 따라 수행해야 한다. 그림 1은 상기 목적에 부합하여 열교환기 수명관리를 수행할 수 있도록 본 연구에서 채택한 수명관리 수행절차를 제시한 것으로서 크게 수명관리 대상 열교환기 분류/선정, 부속기기 분류/선정, 노화기구 분류/선정, 수명평가, 노화관리방안 수립의 다섯 단계로 구분할 수 있다.

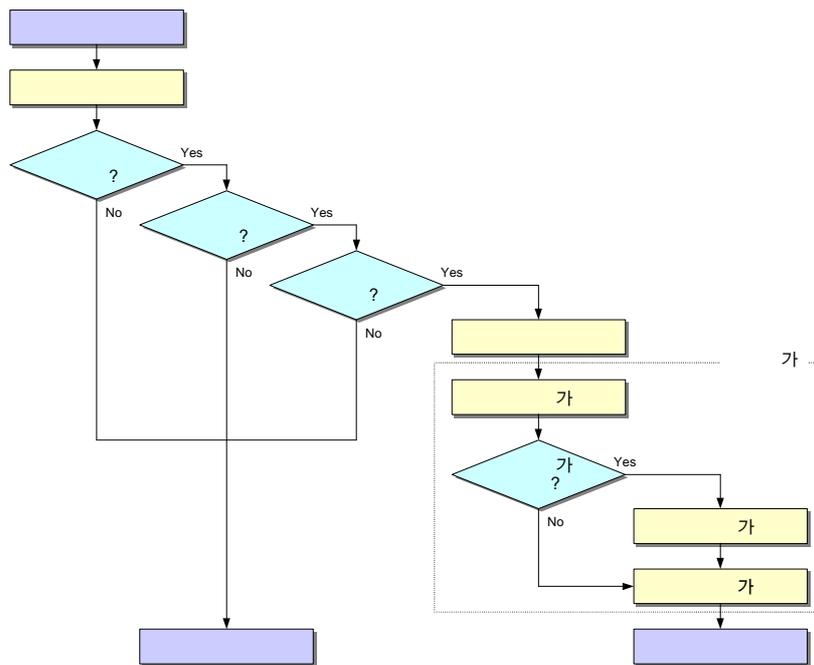


그림 1. 열교환기 수명관리 수행절차

열교환기 분류/선정 단계에서는 원전 1차측에 설치된 모든 열교환기의 설계 및 운전조건을 검토하여 특성에 따라 분류하고 원전 안전에 중요한 영향을 미칠 수 있는 열교환기를 선정한다. 이는 원전 안전에 지대한 영향을 미칠 수 있는 열교환기를 선정하여 수명평가를 수행함으로써 계속운전시 발생할 수도 있는 사고발생 가능성을 미연에 방지하고 노화진행 정도가 심각한 열교환기가 있을 경우에는 조기에 보수하거나 교체함으로써 원전 가동중에 추가로 발생 가능한 경제적인 손실을 줄이기 위함이다.

부속기기 분류/선정 단계에서는 앞 단계에서 선정된 열교환기를 대상으로 원전과 열교환기 건전성에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 부속기기를 선정한다. 실제 열교환기를 구성하고 있는 일부 부속기기의 손상이 열교환기 자체의 고유기능에 영향을 미치기 때문에 열교환기 고유기능과 직접 연관성이 있는 부속기기를 분류해 내는 것이 본 단계의 주요 목적이다. 부속기기 선정시 쉽게 보수 및 교체가 가능하고 수시로 교체를 해야하는 소모품 성격이 강한 부속기기는 수명관리 관점에서 제외시키는 것이 바람직하다.

노화기구 분류/선정 단계에서는 수명관리 대상으로 결정된 열교환기의 부속기기에 손상을 줄 수 있는 노화기구를 선정한다. 노화기구 선정시에는 선행 연구나 운전경험과 각종 문헌을 참조하여 부속기기에 영향을 미칠 가능성이 있는 모든 노화기구를 검토하고 부속기기의 수명을 결정할 만한 노화기구를 선정하는 것이 주요 목적이다.

수명평가는 선정된 부속기기별 노화기구를 대상으로 수행한다. 보다 효율적인 수명평가를 위해서는 선정된 부속기기별 노화기구를 코드화 하거나 적절하게 그룹화 하여 수행할 수도 있으며, 예비평가와 정밀평가의 단계로 구분하여 수행할 수도 있지만 수행방법론은 객관적인 신뢰성을 입증할 수 있어야 한다. 수명평가 결과는 열교환기 부속기기의 잔여수명, 허용기준까지의 시간 등 명확한 수치로 제시되는 것이 대부분이지만 그렇지 않을 수도 있다.

수명평가가 종료되면 평가 결과에 따라 개보수와 같은 적절한 조치를 취하도록 하거나 원전 계속운전 기간 동안 건전한 상태를 유지할 수 있도록 최적의 노화관리방안을 제시한다. 제시된 노화관리방안은 실제 현장에서 기존에 수행하고 있을 수도 있고 신규 적용해야 하거나 기존의 방식을 보완해야 할 경우도 발생한다.

3. 열교환기 수명평가

열교환기 수명관리를 위해서는 단락 2.에서 제시한 절차에 따라 열교환기 분류/선정, 부속기기 분류/선정, 노화기구 분류/선정, 예비평가, 정밀평가 단계로 진행되어야 하지만 수행한 내용을 모두 제시하기에는 너무나 방대하기 때문에 본 고에서는 결과만을 간단히 언급하고 도출된 열교환기 및 부속기기별 노화기구를 대상으로 수행한 정밀평가 내용을 중심으로 언급한다.

열교환기 분류/선정 결과로 도출된 1차측 보조 열교환기는 재생, 유출, 과잉유출, 밀봉수, 잔열제거, 사용후 핵연료저장조 및 기기냉각수 열교환기이다. 선정된 열교환기로부터 수명평가가 필요한 것으로 결정된 부속기기는 채널, 채널덮개, 고정경관, 노즐, 전열관, 동체, 동체덮개, 플랜지, 타이로드, 배플 등 19개 부속기기이다. 그리고 1단계 해외 수행사례 검토, 2단계 실제 수행 원전의 노화발생 가능성 검토의 두 가지 단계를 거쳐 노화기구를 선정한 결과 일반부식, 공식, 침부식, 고주기피로, 저주기피로, Fouling, 마모 등 11개 노화기구에 대한 수명평가가 필요한 것으로 결정되었다. 선정된 노화기구에 대해서는 체계적인 수명평가를 위하여 열교환기별, 부속기기별 노화기구를 각각에 대하여 코드화 하였다. 수명평가는 부여된 개개의 코드별로 수행하였으며, 예비평가와 정밀평가 두 가지 단계를 통하여 수행하였다. 정밀평가를 수행하기 이전에 예비평가를 수행하는 이유는 예비평가 만으로도 기기의 건전성을 입증할 수 있을 경우에는 굳이 시간과 인력을 낭비하면서까지 정밀평가를 수행할 이유가 없기 때문이다. 다음은 본 연구를 통하여 수행한 열교환기 정밀평가 수행방법과 결론을 제시한 것이다.

3.1 유동진동 평가

유동진동(FIV : Flow Induced Vibration)은 유체의 유동에 의해 발생하는 진동현상으로 정의할 수 있다. 원전 1차측에 주로 적용되는 동체-전열관형 열교환기는 전열관 내부로 흐르는 유체뿐만 아니라 배플에 의해 전열관 외부에서 발생하는 복잡한 교차유동으로 인하여

전열관에 심한 유동진동이 발생될 수 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 원전의 유출 열교환기와 재생 열교환기는 설계유속 보다 1.6~3.2배 이상으로 운전되고 있기 때문에 유동진동을 평가한다. 유동진동 평가를 통하여 전열관 진동문제 발생 가능성과 진동 관점의 운전 허용 여유 및 열교환기 관리방안을 모색할 수 있다.

유동진동을 평가하는 방법은 열교환기 제작단계에서 결정되는 전열관 외부의 임계유속과 운전유속을 비교하는 방식을 채택하였다. 열교환기 설계코드인 TEMA Standards[1, 2]에는 운전유속이 임계유속을 초과하지 않을 경우에는 진동측면에서 문제가 없는 것으로 제시하고 있으며, 이를 근거로 고주기피로와 마모관점에서도 문제가 없는 것으로 결론지을 수 있다.

열교환기 스펜(배플과 배플 사이)의 교차 평균유속은 아래 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$V = \frac{F_h W}{M \alpha_x \rho_0 3,600}, \text{ ft/sec} \quad (1)$$

상기 식을 적용하는데 필요한 매개변수는 다음과 같다.

$$F_h = \frac{1}{1 + N_h \left(\frac{D_1}{P} \right)^{1/2}} \quad (2)$$

$$N_h = f_1 C_7 + f_2 A + f_3 E \quad (3)$$

$$M = \frac{1}{1 - \frac{0.70 l_3}{D_1} \left[\frac{1}{M_w^{0.6}} - 1 \right]} \quad (4)$$

$$M_w = m C_1^{1/2} \quad (5)$$

$$\alpha_x = l_3 D_3 C_a \quad (6)$$

$$C_a = 0.00674 \left(\frac{P - d_0}{P} \right) \quad (7)$$

$$A = C_5 C_8 \left(\frac{D_1}{l_3} \right) \left(\frac{d_0}{P} \right)^2 \left(\frac{P}{P - d_0} \right) \quad (8)$$

$$E = C_6 \left(\frac{P}{P - d_0} \right) \left(\frac{D_1}{l_3} \right) \left(1 - \frac{h}{D_1} \right) \quad (9)$$

여기서, D_1 : 동체 내경, 인치

D_2 : 배플 직경, 인치

D_3 : OTL(Outer Tube Limit), 인치

d_1 : 배플 내 전열관 구멍직경, 인치

d_0 : 전열관 외경, 인치

P : 전열관 피치, 인치

l_3 : 배플 사이의 간격, 인치

C_n, f_n : 계수

ρ_0 : 국부 벌크온도에서의 동체측 유체 밀도, lb/ft³

W : 동체측 유량, lb/hr

h : 배플컷 높이, 인치

나머지 변수들에 대해서는 참고문헌 [1, 2]에 자세하게 제시되어 있다.

열교환기 전열관 외부로 흐르는 유체의 교차 임계유속(V_c)은 식 (10)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$V_c = \frac{D f_n d_0}{12}, \text{ ft/sec} \quad (10)$$

여기서, f_n 은 자연 진동수(cycles/sec)로서 열교환기 전열관의 부위에 따라 각기 다르게 적용되며, D 는 무차원 임계 유속인자로서 표 1에 제시하였다.

표 2와 표 3은 유출 열교환기 및 재생 열교환기의 유동진동 평가결과를 제시한 것이며, 그림 2와 그림 3은 평가결과를 도표로 제시한 것이다. 유동진동 평가결과 재생 및 유출 열교환기의 임계유속 기준 허용 여유도는 각각 94.78%와 97.22%로서 현재 수준으로 운전될 경우, 유동진동 관점에서는 특별한 문제점이 발생하지 않을 것으로 예상된다.

표 1. 무차원 임계유속인자, D 계산식

튜브패턴	χ 에 대한 매개변수 범위	무차원 임계유속인자, D
Triangular, 30°	0.1 ~ 1	$8.86 \left(\frac{P}{d_0} - 0.9 \right) \chi^{0.34}$
	1 ~ 300	$8.86 \left(\frac{P}{d_0} - 0.9 \right) \chi^{0.5}$
Rotated Triangular, 60°	0.01 ~ 1	$2.80 \chi^{0.17}$
	1 ~ 300	$2.80 \chi^{0.5}$
Square, 90°	0.03 ~ 7	$2.10 \chi^{0.15}$
	7 ~ 300	$2.35 \chi^{0.5}$
Rotated Square, 45°	0.1 ~ 300	$4.13 \left(\frac{P}{d_0} - 0.5 \right) \chi^{0.5}$

[주] P : 튜브피치, 인치
 d_0 : 튜브외경 또는 작은핀 튜브인 경우에는 핀직경, 인치

$$\chi = \frac{144 w_0 \delta}{\rho_0 d_0^2}$$

δ : 지지되지 않은 스펠에서의 전대수 감소율
 w_0 : 단위 길이당 전열관 질량, lb/ft

표 2. 재생 열교환기 유동진동 평가결과

항 목	설계시점	1999. 11 시점	임계
동체측 유량, lb/hr	19,900.00	33,261.93	-
전열관 교차유속, ft/sec	0.6316	1.0418	19.9574
임계유속 기준 허용 여유도, %	96.8353	94.7799	-

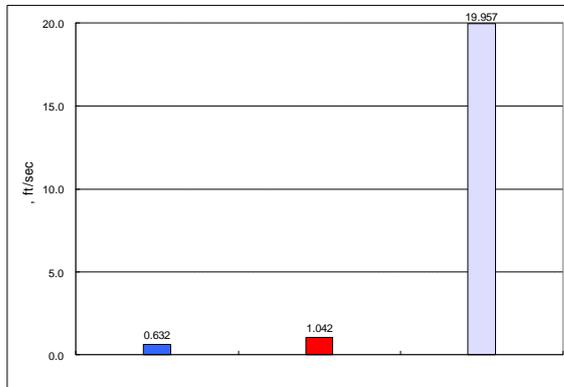


그림 2. 재생 열교환기 유동진동 평가결과

표 3. 유출 열교환기 유동진동 평가결과

항 목	설계시점	1999. 11 시점	임계
동체측 유량, lb/hr	64,728.00	206,455.65	-
전열관 교차유속, ft/sec	0.2109	0.6728	24.1676
임계유속 기준 허용 여유도, %	99.1273	97.2161	-

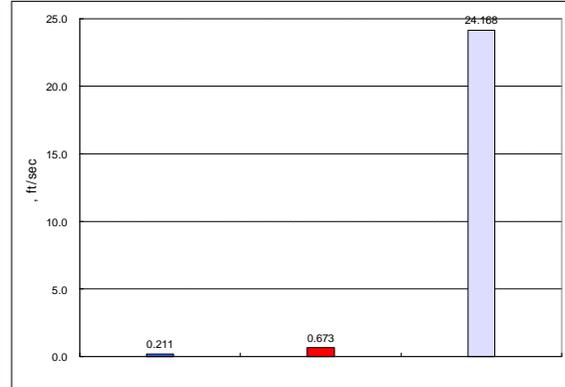


그림 3. 유출 열교환기 유동진동 평가결과

3.2 Fouling 평가

Fouling은 부식 생성물이나 물에 부유하는 이물질 등이 열교환기의 저속 또는 정체부위에 침적되어 유체의 흐름을 방해하고 성능을 저하시키는 현상으로 정의할 수 있다. 원전 1차측의 열교환기 내부로는 붕소처리된 원자로 냉각재와 염소, 하이드라진 등이 포함된 기기 냉각수가 흐르기 때문에 배플-전열관, 고정관판-전열관 사이 등의 유동이 정체되는 부위에서 물에 함유된 화학물질이나 기타 이물질이 재료표면에 고착되거나 원전 정지시 발생할 수 있는 건조와 젖음이 반복될 경우에도 이물질이 전열관 벽 등의 부위에 부착되어 유동을 방해하거나 열효율을 저하시킬 수 있다. 본 고에서는 운전조건이 각기 다른 재생, 유출, 잔열 제거 및 기기냉각수 열교환기를 대상으로 Fouling 평가를 수행한 결과를 제시한다. Fouling 평가를 통하여 열교환기의 현재 오염정도와 세정필요 시점 및 열교환기 관리방안을 모색할

수 있다.

Fouling을 평가하는 방법은 운전 데이터를 활용하여 오염정도를 나타내는 지수인 Fouling Factor를 계산한 후 이를 코드에서 제시하고 있는 허용기준과 비교하는 방식을 채택하였다. ASME OM-S/G Part 2[3]에는 열교환기 운전 허용기준으로서 설계당시의 총괄 열전달계수의 -10%까지를 제시하고 있으며, 본 연구에서는 이를 Fouling Factor로 환산하여 적용하였다. 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, lb_f sec/ft

상기 데이터 취득이 완료되면 공정수 및 냉각수의 열전달량(Heat Duty)을 식 (11)과 식 (12)로부터 계산한다.

$$Q_p = W_p [C_{p_p} (T_1 - T_2)] \quad (11)$$

$$Q_c = W_c [C_{p_c} (t_2 - t_1)] \quad (12)$$

여기서, Q_p 와 Q_c (Btu/hr)는 공정수 및 냉각수 열전달량을 나타낸다. 공정수와 냉각수의 열전달량이 계산되면 열교환기의 냉각방식에 따라 병류일 경우에는 식 (13)을 사용하고 향류일 경우에는 식 (14)를 사용하여 대수평균 온도차(LMTD : Logarithmic Mean Temperature Difference)를 계산한다.

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln \left[\frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)} \right]} \quad (13)$$

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left[\frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)} \right]} \quad (14)$$

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 (15)를 이용하여 보정한다.

$$MTD = LMTD \cdot F \quad (15)$$

여기서, MTD(Mean Temperature Difference)는 보정된 평균 온도차(°F)를 나타내고, F는 대수평균 온도차 보정계수를 나타낸다. 보정된 평균 온도차와 열전달량을 이용한 총괄 열전달계수는 식 (16)으로 계산할 수 있다.

$$U = \frac{Q}{A_o MTD} \quad (16)$$

여기서, U는 외부표면 기준 총괄 열전달계수(Btu/hr-ft²-°F)를 나타내고 A_o 는 외부표면 기준 외부 유효 표면적(ft²)을 나타낸다. 전열관에 냉각핀이 설치되거나 관막음(Plugging)되었을 경우에는 해당 전열면적을 계산에 반영하여야 한다.

총괄 열전달계수가 결정되면 열교환기의 Fouling 정도를 판단할 수 있도록 Fouling Factor(r_f)를 도입한다. Fouling Factor는 총괄 열전달계수 계산 식 (17)로부터 계산이 가능하다.

$$U = \frac{1}{\left[r_f + \frac{1}{h_o} \frac{1}{E_f} + r_w + \frac{1}{h_i} \frac{A_o}{A_i} \right]} \quad (17)$$

여기서, h_o 와 h_i 는 각각 외부표면 기준 외부 열전달계수(Btu/hr-ft²-°F)와 내부표면 기준 내부 열전달계수를 나타낸다. r_i, r_o, r_i, r_w 는 각각 외부표면 기준 전체 오염저항(hr-ft²-°F/Btu), 외부표면 기준 외부 오염저항, 내부표면 기준 내부 오염저항 및 외부표면 기준 관벽저항을

나타낸다. 그리고 A_i 는 내부표면 기준 내부 유효표면적(ft^2), E_f 는 가중 핀효율(핀이 없을 경우 1, 핀이 있는 경우 1 이하)을 나타낸다. 외부표면 기준 전체 오염저항(r_i)과 외부표면 기준 관벽저항(r_w)은 각각 식 (18)과 (19)를 이용하여 구할 수 있다.

$$r_t = r_o \frac{1}{E_f} + r_i \frac{A_o}{A_i} \quad (18)$$

$$r_w = \frac{d_o}{24 k} \ln\left(\frac{d_o}{d_o - 2t}\right) \quad (19)$$

내부표면 기준 내부 열전달계수는 난류유동($Re > 10,000$)인 경우에는 식 (20)으로 계산하고 층류유동($Re < 2,100$)인 경우에는 식 (21)을 이용하여 계산한다.

$$h_i = 0.023 \frac{12 k_t}{d_i} Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (20)$$

$$h_i = 1.86 \frac{12 k_t}{d_i} Re^{1/3} Pr^{1/3} \left(\frac{d_i}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (21)$$

여기서, k_t 는 전열관측 유체의 벌크 열전도도($\text{Btu/hr-ft}^\circ\text{F}$), d_i 는 전열관 내경(in), μ_t 는 전열관측 유체의 벌크 절대점도(cP), μ_w 는 전열관벽 온도에서 전열관측 유체의 벌크 절대점도(cP), L 은 전열관 전체길이(in), ρ 는 전열관측 유체의 벌크 밀도(lb/ft^3), V 는 유량과 교차유동 단면적에 근거한 전열관 내 유속(ft/sec)을 나타낸다. 그리고 전열관측 유체의 무차원 Re (Reynolds Number)와 Pr (Prandtl Number)는 식 (22)와 (23)으로 구할 수 있다.

$$Re = \frac{124 \rho V d_i}{\mu} \quad (22)$$

$$Pr = \frac{2.42 C_p \mu d_i}{k} \quad (23)$$

외부표면 기준 외부 열전달계수(h_o)는 식 (24)를 이용하여 계산한다.

$$h_o = h_k J_c J_i J_b J_r \quad (24)$$

여기서, h_k , J_c , J_i , J_b , J_r 은 각각 동체측 열전달계수, 배플형상 보정계수, 배플 누설효과 보정계수, 전열관 다발 우회효과 보정계수 및 역온도구배 누적(Adverse Temperature-gradient Buildup) 보정계수를 나타내며, 자세한 계산 방법은 참고문헌[4]에 제시되어 있다.

이와 같이 모든 변수에 대한 계산이 완료되면 식 (25)로부터 전열관 내부 및 외부의 오염저항이 모두 고려된 전체 Fouling Factor(r_t)를 계산할 수 있다.

$$r_t = \frac{1}{U} - \frac{1}{h_o} \frac{1}{E_f} - r_w - \frac{1}{h_i} \frac{A_o}{A_i} \quad (25)$$

표 4에서 표 7까지는 잔열제거, 유출, 재생 및 기기냉각수 B 열교환기의 Fouling 평가 결과를 제시한 것이며, 그림 4부터 그림 7까지는 평가결과를 도표로 제시한 것이다. Fouling 평가 결과, 원자로 냉각 및 핵연료 재장전 동안 원자로 냉각재의 온도를 정지냉각 온도로 감소시키기 위해 약 1년에 한 번 정도만 운전되는 잔열제거 열교환기의 오염정도는 25.4% (설계대비)인 반면 정상운전 중에 항상 가동하는 유출 및 재생 열교환기의 오염정도는 0.0% 인 것으로 확인되었다. 잔열제거 열교환기의 오염정도는 유출 및 재생 열교환기에 비해 상대적으로 높지만 설계수명의 2/3를 경과한 현재의 Fouling Factor가 설계값의 25.4%이므로 열교환기의 열성능에는 문제가 없는 것으로 결론지을 수 있다. 그리고 기기냉각수 열교환기 B는 전열관측으로 천연수인 해수가 통과하고 동체측으로는 기기냉각수가 통과하기 때문에 타 열교환기에 비해 오염정도가 심할 것으로 예상되지만 상업운전 개시 10년 후에 전열관을 모두 교체하였고 데이터 취득시점에 열교환기 전열관을 청소하였기 때문에 Fouling Factor는 설계값 대비 7.06%로서 예상보다 낮은 것으로 확인되었다. 그러나 기기냉각수 열교환기의 전열관 내부로는 수처리를 하지 않은 해수가 통과하기 때문에 열교환기 열효율 및 기기 건전성 유지를 위한 지속적인 관심을 가져야 할 것으로 판단된다.

상기와 같은 Fouling 관점에서 수행한 열교환기 성능평가는 현장에 적용된 바 없는 최초 시도로서 주기적으로 데이터를 취득하여 분석할 경우 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

표 4. 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	정상운전
설계수명 종료시점	0.00020	33.9	

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	-

표 6. 재생 열교환기 평가결과 요약

항 목	Fouling Factor	설계대비 오염정도, %	비 고
Criteria	0.000641	-	총괄 열전달계수의 90%
설계값	0.000233	100	설계시 고려한 오염정도 기준
현재(1999)	0.000000	0.0	정상운전
설계수명 종료시점	0.000000	0.0	-

표 7. CCW 열교환기 B 평가결과 요약

항 목	Fouling Factor	설계대비 오염정도, %	비 고
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	-

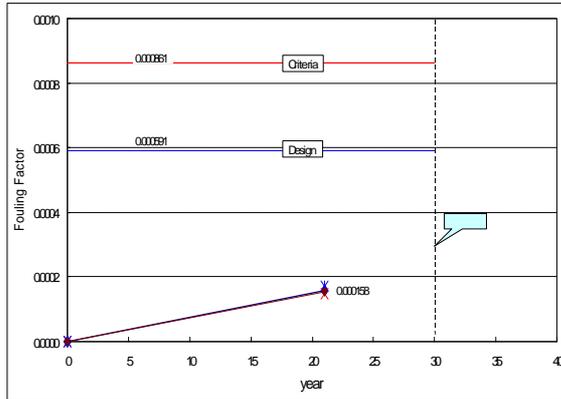


그림 4. 잔열제거 열교환기 평가 그래프

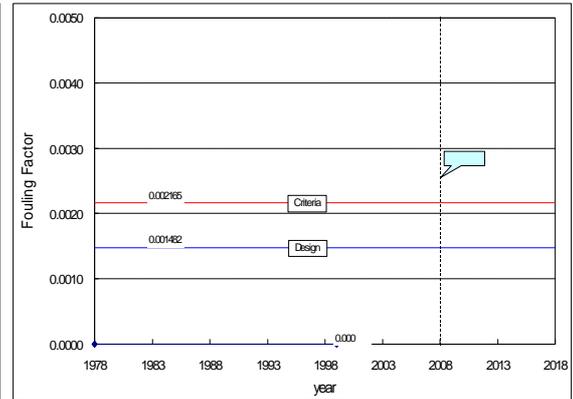


그림 5. 유출 열교환기 평가 그래프

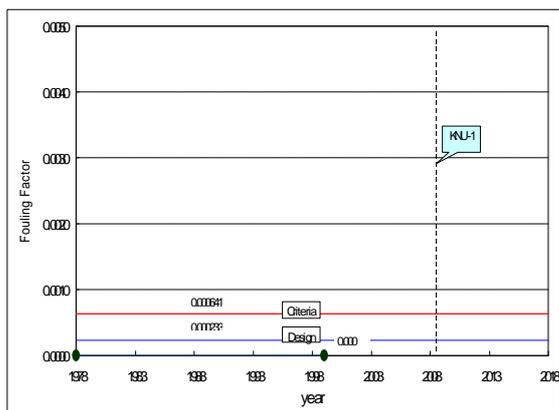


그림 6. 재생 열교환기 평가 그래프

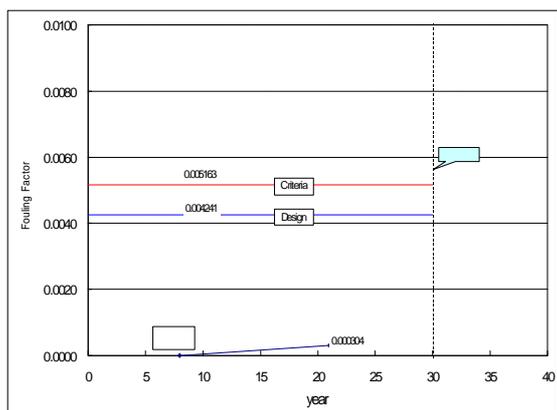


그림 7. CCW 열교환기 B 평가 그래프

3.3 해수 침부식 평가

해수는 심한 부식특성을 갖고 있으며 해수가 유로를 통과할 때 기기재료에는 침식현상이 동시에 작용하여 급격한 감속손상을 유발할 수 있다. 이러한 현상을 해수 침부식이라 하며 이는 해수 흐름에 의해 가속화되는 재질의 부식현상으로 정의할 수 있다. 원전 1차계통 보

조 열교환기 중 해수가 통과하는 기기는 1차계통에서 발생하는 열을 해수로 전달하는 역할을 하는 기기냉각수 열교환기로서 전열관을 통하여 해수가 흐른다. 이에 따라 기기냉각수 열교환기 A, B, C, D 4기의 전열관을 대상으로 해수 침부식 평가를 수행하였다. 기기냉각수 열교환기 전열관을 대상으로 수행한 해수 침부식 평가를 통하여 해수가 통과하는 전열관의 감속 정도 예측, 해수 침부식 관점의 전열관 잔여수명 예측 및 열교환기 관리방안을 제시할 수 있다. 본 연구에서 해수 침부식을 평가하는 방법은 International Nickel사에서 조사해 둔 경험 및 실험 데이터[5]를 활용하여 유속에 따른 해수 침부식률을 보수적으로 산출하고 이를 이용하여 현재의 전열관 두께와 전열관 설계 및 제작 코드에 제시된 최소요구두께와 비교하는 준정량적인 방식을 채택하였다.

International Nickel사에서 조사한 경험 및 실험 데이터를 활용하여 유속에 따른 해수 침부식률을 보수적으로 산출한 결과에 따르면 기기냉각수 열교환기 전열관 재료인 알루미늄 황동의 침부식률은 해수 유속이 1ft/sec일 경우에는 2mdd, 27ft/sec일 경우에는 105mdd로 제시되어 있다. 다른 재료일 경우에는 해수 유속에 따라 침부식률이 지수함수적으로 증가하기 때문에 본 연구에서는 식 (26)과 같은 산술적인 방식을 적용하여 보수적으로 실제 운전 유속에 대한 해수 침부식률(r_{sw})을 산출하였다.

$$r_{sw} = \frac{(v_{sw} - 1) \times (105 - 2)}{27 - 1} + 2 \quad (26)$$

여기서, v_{sw} 는 전열관 내부 유속(ft/sec)을 나타내며, 감속된 전열관의 현재 두께(t_c)는 식 (27)을 이용하여 구할 수 있다.

$$t_c = t_{design} - r_{sw} \cdot t \quad (27)$$

여기서, t_{design} 은 전열관 설치두께, t 는 운전시간을 나타낸다. 그리고 최소요구두께(t_m)는 아래의 두 식 중 큰 값을 적용한다[6].

$$t_m = \frac{P d_o}{2S + 0.8P} \quad (28)$$

$$t_m = \frac{P d_o}{200S + 0.8P} \quad (29)$$

여기서, P는 설계압력(psig), S는 설계 허용응력(psi), d_o 는 전열관 외경(in)을 나타낸다. 해수 침부식에 의한 전열관의 잔여수명(L_r)은 아래 식과 같이 잔여두께(t_r)를 연간 침부식률(W_r)로 나누어 구할 수 있다.

$$L_r = \frac{t_r}{W_r} \quad (30)$$

표 8은 기기냉각수 열교환기 A, B, C, D에 대한 해수 침부식 평가 결과를 제시한 것이며, 그림 8은 평가결과를 도표로 제시한 것이다. 기기냉각수 열교환기 C와 D는 1986년에 그리고 A와 B는 1988년에 전열관을 전면 교체하였기 때문에 두께 변화율은 각각 1986년과 1988년을 기준으로 계산하였다. 해수 침부식 평가결과 열교환기 B의 전열관이 해수 침부식에 가장 영향을 받고 있는 것으로 확인되었으며, 이는 주로 유속에 기인한 것으로 판단된다. 열교환기 전열관 B의 최소요구두께를 기준으로 한 잔여수명은 32.37년으로 계산된 바 해수 침부식만을 고려할 때는 상업운전 시작 이후 60년까지도 문제가 없을 것으로 예상되지만 기기냉각수 열교환기 전열관에는 진동, Fouling, 균열 등이 미소하지만 동시에 작용할 경우에는 보다 심각한 손상이 예상된다. 따라서 설계수명 이후 계속운전을 위해서는 적절한 수질관리 및 예방정비 프로그램 수행이 필요한 것으로 판단된다.

표 8. 기기냉각수 열교환기 해수 침부식 평가결과 요약

항 목	단위	A	B	C	D	비 고
운전유속	ft/sec	2.396	2.704	2.285	2.604	1999년 10월
설치두께	in	0.071	0.071	0.071	0.071	Tech. Spec.
최소요구두께	in	0.005	0.005	0.005	0.005	KEPIC
현재두께	in	0.056	0.053	0.055	0.052	계산
설계수명 종료시점의 두께	in	0.045	0.041	0.045	0.040	2008년 4월
잔여수명	yr	39.552	32.370	41.166	32.876	2000년부터

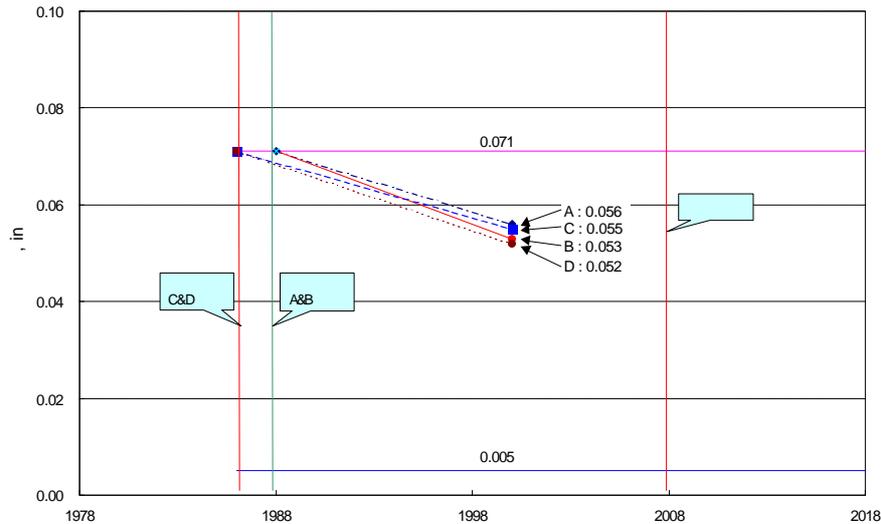


그림 2.5-8 CCW 열교환기 전열관 해수 침부식 평가 그래프

4. 노화관리방안

노후화된 원전 열교환기를 대상으로 노화관리방안을 수립하는 목적은 설계수명 이상 계속운전시 안전과 밀접한 연관성이 있는 주요 열교환기를 대상으로 설계수명 이후의 기간 동안에도 안전성과 건전성을 유지할 수 있도록 최적의 관리방안을 제시하기 위함이다. 일반적으로 원전에서는 설계수명 동안 안전운전을 위한 가동중검사(ISI), 가동중시험(IST), 감시(Monitoring), 수질관리, 정기점검, 일상보수 등과 같은 노화관리 프로그램(AMP : Aging Management Program)을 수행하고 있다. 그러나 설계수명 동안에 수행되고 있는 노화관리 프로그램을 원전 연장운전 기간 동안에 동일하게 적용하여 열교환기의 안전성과 건전성을 유지하기는 어렵다. 기술적 측면에서 원전 연장운전의 가능성을 입증하기 위해서는 원전의 핵심기기 중 하나인 열교환기와 해당 부속기기에서 발생하는 모든 노화기구가 연장운전 기간 동안에도 적절하게 관리된다는 것 또한 입증되어야 한다. 이에 따라 본 노화관리방안 연구에는 대상이 되는 열교환기와 부속기기를 중심으로 해외에서 인허가갱신을 위하여 마련한 노화관리 프로그램과 현장에서 기존에 수행하고 있던 노화관리 프로그램을 검토하고 열교환기 수명평가 결과를 반영하여 기존 프로그램으로도 적절한 관리가 가능한지의 여부를 결정한다. 기존 프로그램으로도 원전 계속운전 기간 동안에 열교환기의 건전성을 충분히 유지할 수 있거나 그렇지 않다고 판단될 경우에는 현행 또는 신규 노화관리 프로그램을 제시하고 수정이나 변경이 필요한 경우에는 개선된 노화관리 프로그램을 제시한다.

본 고에서 대상으로 하고 있는 원전 1차측 보조 열교환기와 관련하여 현장에서 기존에 수행해 오고 있는 노화관리 프로그램은 다음과 같다.

- 가동중점검 프로그램 : 재생, 유출, 과잉유출, 밀봉수 및 잔열제거 열교환기
- 수질관리 프로그램 : 전체 열교환기
- 육안 누설점검 프로그램 : 재생, 유출, 과잉유출, 밀봉수, 잔열제거, 기기냉각수 및 사용후 핵연료저장조 열교환기
- 열성능 점검 프로그램 : 잔열제거 및 기기냉각수 열교환기

표 9는 본 고에서 수명평가를 수행한 열교환기와 평가 노화기구만을 대상으로 노화관리방안을 수립한 결과를 제시한 것이다. 이는 열교환기별로 수명평가를 수행한 결과와 해외현황, 현장검사 등 기타 검토결과를 반영하여 원전 계속운전시 최적으로 건전성을 유지할 수 있도록 제시한 노화관리 프로그램으로서 실제 시행여부는 현장의 여건을 반영하여 최종 결정되어야 할 것으로 판단된다. 여기서 기기냉각수 열교환기의 전열관은 해수 침부식 측면에서는 문제가 없는 것으로 계산되었지만 현재 각 열교환기별로 20여 개의 전열관이 관막음 된 상

태이고 진동, 미생물부식, 공식 등 타 노화기구와 복합적으로 작용할 가능성이 크기 때문에 원전 계속운전을 위해서는 전열관 전면교체가 필요한 것으로 판단된다.

표 9. 열교환기 수명평가 결과 및 노화관리 프로그램 타당성 검토

Hx.	노화 기구	해당 부속기기	수명평가 결과	해위현황 (AMP)	현 AMP 타당성 (신규/개선 여부)	비고
재생	Fouling	동체내부 전체 부속기기	○설계대비 오염정도 0%	Ⓜ:열성능감시 ①:수질감시	▷기존 : 수질관리 ▶신규:열성능 감시 Pro. (5년주기)	현장 선택사안
	FIV (진동/마모/고주기피로)	전열관, 배플, 고정관판	○임계유속 기준 허용 여유도 94.78%	Ⓜ:진동감시, ECT	▶신규:진동감시 ▶신규:ECT	현장 선택사안
유출	Fouling	동체내부 전체 부속기기	○설계대비 오염정도 0%	Ⓜ:열성능감시 ①:수질감시	▷기존 : 수질관리 ▶신규:열성능 감시 Pro. (5년주기)	현장 선택사안
	FIV (진동/마모/고주기피로)	전열관, 배플, 고정관판	○임계유속 기준 허용 여유도 97.22%	Ⓜ:진동감시, ECT Ⓞ:EN-1-300	▶신규:진동감시 ▶신규:ECT	현장 선택사안
잔열 제거	Fouling	동체내부 전체 부속기기	○설계대비 오염정도 25.4%	Ⓜ:열성능감시 ①:수질감시	▷기존 : 수질관리, 열성능 감시	기존 AMP 타당
기기냉각수	Fouling	동체내부 전체 부속기기	○설계대비 오염정도 7.06%	Ⓜ:해수감시 Ⓜ:열성능감시, 해수감시 ①:열성능감시	▷기존 : 수질관리, 열성능감시	기존 AMP 타당
	해수 침부식	전열관	○Hx. A 잔여수명 39.55년 ○Hx. B 잔여수명 32.37년 ○Hx. C 잔여수명 41.17년 ○Hx. D 잔여수명 32.88년	Ⓜ:해수감시 Ⓞ:수질감시 Ⓜ:ECT ①:ECT	▷기존 : 정비/보수, ECT	계속운전을 위해서는 전열관 전면교체 필요

[주] Ⓜ : WOG, ① : Turkey Point, Ⓞ : CCNPP, Ⓜ : GALL

5. 결론

본 고는 설계수명에 임박한 원전을 최적 경제수명까지 계속운전 하기 위한 수명관리연구의 일환으로 원전 안전에 중요한 영향을 미치는 1차측 보조 열교환기를 대상으로 수명평가를 수행한 결과와 이에 따른 노화관리방안을 제시하는데 중점을 두었다. 이에 따라 본 고의 서두에서는 원전 1차측에 설치된 많은 열교환기를 대상으로 제한된 기간 내에 수명평가를 수행하고 최적의 노화관리방안을 수립하기 위하여 본 연구에서 개발한 열교환기 수명관리수행절차를 간략하게 제시하였다.

상기 절차에 따라 선정된 열교환기, 부속기기 및 노화기구를 대상으로 예비평가를 수행한 결과, 보다 정밀하게 평가할 필요성이 있는 것으로 결정된 노화기구에 대해서는 모두 정밀평가를 수행하고 원전 계속운전 시에도 무리 없이 열교환기의 건전성을 유지할 수 있도록 관리방안을 제시하였다. 그러나 본 고를 통하여 모든 내용을 언급하기에는 제약이 있기 때문에 실제 수행한 내용 중 일부만을 선별하여 함축적으로 제시하였으며, 노화관리방안 역시 본 고에서 제시한 정밀평가 결과에 따라서만 적절한 방안을 제시하였다. 본 연구를 통하여 제시한 노화관리방안의 실제 시행여부는 추후 현장의 여건을 반영하여 최종 결정되어야 할 것으로 판단된다. 열교환기별 수명평가 결과와 이에 따른 노화관리방안은 표 9에 제시하였다.

참고문헌

1. TEMA, Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, Seventh Edition, 1988.
2. TEMA, Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, Seventh Edition, 1974.
3. ASME, Standards and Guides for Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants, ASME OM-S/G-Part 2, 1994.
4. Perry and Green, Chemical Engineer's Handbook, Sixth Edition, McGraw Hill.
5. 이학렬, 금속부식공학, 연경문화사, pp 53 ~ 123, 1991.
6. KEPIC, 전력산업기술기준, MGB 일반기계 압력용기, 2000.